

分析化学手册

FENXIHUAXUESHOUCE

第三分册

光谱分析



化学工业出版社

CHEMICAL INDUSTRY PRESS

分析化学手册

（第二版）

第三分册

光谱分析

柯以侃　董慧茹　主编

化学工业出版社
·北　京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

分析化学手册　第三分册：光谱分析/柯以侃，董慧茹主编．—2 版．—北京：化学工业出版社，1998
ISBN 7-5025-2095-3

Ⅰ．分…　Ⅱ．①柯…②董…　Ⅲ．①分析化学-手册②光谱分析-手册　Ⅳ．065-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（98）第 02167 号

分析化学手册

（第二版）

第三分册

光谱分析

柯以侃　董慧茹　主编

责任编辑：任惠敏　田　桦

责任校对：陶燕华

封面设计：于　兵

*

化学工业出版社出版发行

（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码 100029）

新华书店北京发行所经销

北京市燕山联营印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16　印张 84¾　字数 2118 千字

1998 年 9 月第 2 版　1998 年 9 月北京第 1 次印刷

印　数：1—3000

ISBN 7-5025-2095-3/TQ·1035

定　价：135.00 元

《分析化学手册（第二版）》编辑委员会

程介克　武汉大学
陈洪渊　南京大学
于德泉　中国医学科学院药物研究所
张玉奎　中国科学院大连化学物理研究所
张孙玮　杭州大学
刘振海　中国科学院长春应用化学研究所
丛浦珠　中国医学科学院药物研究所
彭图治　杭州大学
杨峻山　中国医学科学院药用植物研究所
柯以侃　北京化工大学
王国顺　杭州大学
任惠敏　化学工业出版社

第二版前言

分析化学是人们获得物质化学组成和结构信息的科学。由于多学科的交叉渗透，现代分析化学已发展成为一个庞大的学科体系，建立起了比较成熟的多种分析方法，包括色谱分析、电化学分析、光谱分析、波谱分析、质谱分析、化学分析、热分析、放射分析、生化分析等。它一方面在科学研究中起着至关重要的作用，极大地推动着其他学科的发展；另一方面还直接服务于国民经济和生产建设的需要。同时，当代科学技术和人类生产活动的飞速发展也向分析化学学科提出了严峻的挑战，并带来了前所未有的发展机会。

我国的分析化学学科在新中国建立以来，特别是改革开放以后，取得了长足的发展。到目前为止，在全国范围内已形成了一支以中国科学院和高等院校及各部委研究所为核心的分析化学科研队伍，和一个涉及生物、环境、材料、临床、医药、地质、冶金、石化、宇航、商检、法医、侦破和考古等领域的庞大分析检验队伍，共同构成了我国分析化学学科研究发展的源泉和推广应用的基地。在多年的发展过程中，无论是分析化学的基础理论，还是实际应用方面，都已形成了丰富的知识和经验的积累，需要进一步的总结和推广。

《分析化学手册》是一部比较全面的反映现代分析技术，供化学工作者使用的专业工具套书。手册第一版自 1979 年出版以来，在读者中形成了一定的影响，已成为许多分析化验室的必备图书。但由于受组稿时的历史条件所限，加上近 20 年来是世界和我国的科学技术，包括分析化学学科飞速发展的时期，原手册第一版在内容和编排上已不能全面反映当前我国分析化学的发展现状。因此，根据广大读者的要求，我们组织了这套《分析化学手册》的修订工作。

在第一版原有 6 个分册的基础上，这次经扩充和修订为以下 10 个分册：

第一分册　基础知识与安全知识
第二分册　化学分析
第三分册　光谱分析
第四分册　电分析化学
第五分册　气相色谱分析
第六分册　液相色谱分析
第七分册　核磁共振波谱分析
第八分册　热分析
第九分册　质谱分析
第十分册　化学计量学

其中第一分册为基础内容，收集了分析工作中常用的基础数据、分析实验室

的安全知识及分析数据的常规处理、计算机应用的基础知识。第十分册所涉及的化学计量学是近些年来发展非常迅速的化学学科的一个分支，与分析化学有着特殊密切的关系，它应用数学和统计学的方法，并引入计算机科学的发展成果，其研究对象几乎涉及分析化学的所有过程，对于设计或选择最优的分析方法，解析大量的化学分析数据以最大限度地获取化学信息等具有普遍的指导意义，因此修订时增加这一部分内容。其他各分册均是按分析方法及所采用的主要仪器类型来划分，大体包括两方面的内容：基础原理、基础数据部分和实际应用部分。

本次修订，在内容上我们着重收录了基础性的理论和发展较为成熟的方法及应用，注意推陈出新，更新有关数据，增补各自领域近些年的新发展新成果，特别是计算机应用、多种分析手段联用技术的发展，以及分析技术应用于生命科学等的内容。

在编排方式上，进一步突出了手册的可查性。各册均编排主题词索引，与目录相互补充。手册中所涉及的名词术语统一采用国家自然科学名词审定委员会发布的标准，计量单位参照国家标准《GB 3100～3102—93·量和单位》的有关规定贯彻执行。其他凡有国家标准的也一律采用相关最新标准。

第二版的重编修订工作得到了我国分析化学界的大力支持，包括11位中国科学院院士在内的近30位知名专家、学者应邀担任了手册修订的编委会成员，全套书的修订出版凝聚着他们大量的心血和期望，在此谨向他们，以及在编写过程中曾给予我们热情支持与帮助的有关院校、科研单位及厂矿企业的专家和同行们，致以衷心的感谢。同时我们也真诚地期待着广大读者的热情关注和批评指正。

《分析化学手册》编委会

1996年6月

本分册修订说明

本分册第一版包括光学分析和电化学分析两部分。自第一版出版至今已有15年，在此期间，光谱分析得到了飞速的发展。例如反映我国光度分析特点的多元络合物光度分析，无论在深度还是广度方面都取得了瞩目的成果；FTIR 和 FT-Raman 技术的应用给红外光谱和拉曼光谱带来了革命性的改变，使其作用和地位起了戏剧性的变化；计算机、化学计量学、各种新材料和元件器的应用把光谱分析及其测试技术推上了一个新的台阶。鉴于此原分册第二篇光学分析法的内容已不能反映光谱分析发展现状。本次修订将光谱分析作为独立的分册，对书的内容作了大幅度的调整和更新。原分册名为光学分析，光学分析可分为光谱分析和非光谱分析两大类。后者是利用辐射与物质作用产生在方向上或物理性质上的变化进行分析，这类方法有比浊法、折光分析、旋光分析、圆二向色性法及X射线衍射等等。这些内容不包含在本分册中，故本分册名为光谱分析，共六篇二十四章。光谱分析是按照原子光谱和分子光谱的顺序编排的，本册前三篇为原子光谱分析，包括原子发射光谱分析、原子吸收光谱分析、原子荧光光谱分析和X射线光谱分析；后三篇为分子光谱分析，包括紫外和可见光谱分析，红外和拉曼光谱分析以及荧光分析法。本次编写着重查阅了80年代以来的文献，收集和汇总了近期的各种光谱分析资料和数据。其中在应用方面的许多表格都是根据散在文献上的资料进行编制的，特别是对国内光谱分析应用方面的文献做了较全面的介绍。全书贯彻《中华人民共和国国家标准GB3100～3102--93量和单位》的有关规定，所有物理量和数据全部以法定计量单位表示，或列出了换算公式。各篇章中都列出数据表格出处及有关参考文献。

原第三分册电化学分析与光学分析是由杭州大学化学系分析化学教研室编写，本次修订由北京化工大学应用化学系工业分析教研室部分教师承担，参加编写工作的有：柯以侃（第一章、第十八至第二十一章）、董慧茹（第二章至第五章、第十章至第十二章）、周心如和柯以侃（第十三章至第十七章）、李增和和柯以侃（第六章至第八章）、王志华（第二十二章至第二十四章）、张丽娟（第九章）、全书由柯以侃、董慧茹主编。

清华大学邓勃教授和北京微量化学所王敬尊教授担任本书稿主审，二位教授对本书初稿作了缴细的审阅，提出了许多十分宝贵的修改意见，对本书的最后定稿起了重要作用，在本书确定编写大纲和修订过程中得到了我国著名分析化学专家本手册编委会委员：周同惠教授、陆婉珍教授、梁晓天教授、王夔教授、慈云祥教授、汪尔康教授、高鸿教授、黄本立教授、高小霞教授和任惠敏副编审及在京的部分专家周天泽教授和齐文启教授等诸多专家的指导和帮助，在此致以衷心感谢。

在这次修订中，我们认真听取各方意见，全力以赴，力求新版能反映光谱分析方面的新发展，以满足读者的要求。但光谱分析涉及的面很宽，文献数量浩瀚，又由于时间较紧，而我们自身的知识面及水平有限，虽力求谨慎，并经仔细校订，但种种缺点与不足乃至错误实所难免，尚祈分析化学界的专家及广大读者批评指正，是所企盼。

编者

1998年4月于北京

内容提要

第二版《分析化学手册》在第一版的基础上做了较大幅度的调整、增删和补充。全套手册由10个分册构成：基础知识与安全知识、化学分析、光谱分析、电分析化学、气相色谱、液相色谱、核磁共振波谱、热分析、质谱和化学计量学。

在第二版《分析化学手册》中注意贯彻了国家法定计量单位制关于量和单位的基本原则。在取材上突出实用性，注重基础知识、基础数据与最新发展并容，在内容上注重科学性和准确性。在编排上强调系统性和查阅方便。

本分册由六篇(24章)构成，所收录内容涵盖了几乎所有的原子光谱和分子光谱分析方法及应用。有光谱分析的基础理论、原理及术语、定义，发射光谱、原子吸收光谱、原子荧光光谱、X射线光谱、紫外-可见光谱、红外与拉曼光谱、分子荧光与磷光及化学发光光谱的基础理论、分析仪器与试剂，以及这些方法在各个领域中的应用数据资料。

本书是分析化学工作者的案头工具书，本册可供各行业中从事光谱分析、色谱分析及质谱分析工作的技术人员和大专院校相关专业师生查阅。

目　　录

第一篇　光谱分析导论与发射光谱分析

第三篇 X射线光谱分析

第四篇 紫外-可见光谱分析法

第五篇 红外与拉曼光谱分析法

第六篇 荧光、磷光及化学发光分析法

表 目 录

第一篇　光谱分析导论与发射光谱分析

第一章　光谱分析导论

光学光谱分析是研究物质的光辐射，或辐射与物质的相互作用，并以此为基础而建立的分析方法的一门学科。光学光谱分析法可分为光谱分析法和非光谱分析法两大类；前者以测定物质发射或吸收辐射的波长和强度为基础，这是本手册介绍的内容。非光谱分析法利用辐射与物质作用产生在方向上或物理性质上的变化而进行分析，这类变化有反射、散射、折射、色散、干涉、偏振和衍射等，与其相关的分析方法有比浊法、折光分析、旋光分析、圆二向色性法以及X射线衍射等，这些方法将不作专章讨论，部分内容在有关章节中涉及。

光谱分析按产生光谱的基本微粒的不同可分为原子光谱和分子光谱；根据辐射传递的情况又可分为发射光谱和吸收光谱。本书第一篇至第三篇讨论原子光谱分析法，第四篇至第六篇讨论分子光谱分析法。本章扼要介绍电磁辐射的性质及有关术语，光谱分析法的分类，光谱分析法仪器概述和有关光谱分析法的国内外期刊及其他文献等。

第一节　有关物质的辐射和光学性能的术语[1]

（1）电磁辐射（electromagnetic radiation）　属于电磁波领域内的能量传播。按波长分类有如下数种。

电磁波	波长/nm	电磁波	波长/nm
γ射线	5×10^{-4}～0.014	可见光	380～780
硬X射线	0.014～0.14	近红外线	780～3000
软X射线	0.14～10	中红外线	3×10^{3}～3×10^{4}
远紫外线	10～200	远红外线	3×10^{4}～3×10^{5}
紫外线	200～380	微波	3×10^{5}～10^{9}

（2）光（light）　光是一种电磁辐射。能为正常人的视力所感受到的电磁辐射为可见光，其波长为（380～780）nm。

（3）波长（wavelength）λ　在周期波传播方向上，相邻两波同相位点间的距离。为了方便起见，通常在波形的极大值或极小值处进行测量（图1-1）。

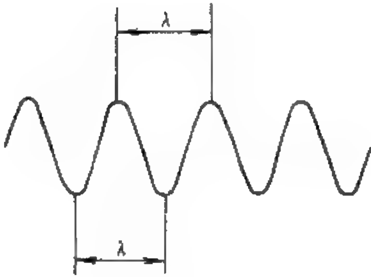


图1-1　测量波长示意图

注：介质中的波长等于真空中的波长除以介质的折射率。若没有说明，一般指的是真空中波长

单位：

SI单位的倍数	单位符号
1	m
10^{-1}	dm
10^{-2}	cm
10^{-3}	mm
10^{-6}	μm
10^{-9}	nm
10^{-12}	pm

由于各波谱区的波长范围不同，习惯上用不同单位表示：γ射线和X射线、可见光、紫外

光和远紫外光用 nm；红外光常用 μm 和波数 cm^{-1}；微波用 mm；射频用 m。

(4) 波数 (wave number) σ　每厘米中所含波的数目，即等于波长的倒数。

$$\sigma=1/\lambda$$

单位：cm^{-1}（每厘米）

若波长以 μm 为单位，波数与波长的换算为

$$\sigma/cm^{-1}=\frac{1}{\lambda/cm}=\frac{10^4}{\lambda/\mu m}$$

(5) 频率 (frequency) ν，(f) 单位时间内电磁辐射振动周数。

$$\nu=N/t$$

式中，N 是电磁辐射振动周数，t 是时间。

单位：

SI 单位的倍数	单位符号	SI 单位的倍数	单位符号
10^{15}	pHz；fs^{-1}	10^6	MHz；μs^{-1}
10^{12}	THz；ps^{-1}	10^3	kHz；ms^{-1}
10^9	GHz；ns^{-1}	1	Hz；s^{-1}

电磁辐射频率、波长和进行速度 V 三者间的关系为

$$V=\nu\lambda$$

在真空中，辐射的速度与频率无关，此速度以符号 c 表示，其值为 $299792458m\cdot s^{-1}$。无论在真空还是空气中，上式可以三位有效数字表示为

$$c=\nu\lambda=3.00\times10^8m\cdot s^{-1}=3.00\times10^{10}cm\cdot s^{-1}$$

(6) 辐［射］能 (radiant energy) Q　以辐射的形式发射、传播或接收的能量。

单位：

SI 单位的倍数	单位符号	SI 单位的倍数	单位符号
1	J	10^{-6}	μJ
10^{-3}	mJ		

$$1J=1kg\cdot m^2\cdot s^{-2}=1W\cdot s=1N\cdot m$$

(7) 辐［射］能密度 (radiant energy density) w，(u)　体积元内的辐射能除以相应的体积元。

单位：$J\cdot m^{-3}$（焦［耳］每立方米）

(8) 辐［射］能密度的光谱密集度 (spectral concentration of radiant energy density) w_λ　在无穷小波长范围内的辐射能密度除以该波长范围。

单位：$J\cdot m^{-4}$（焦［耳］每四次方米）

(9) 辐射（光）通量 (radiant flux) ϕ　以辐射（光）的形式发射、传播和接收的功率。

单位：W(瓦特)

(10) 辐射强度 (radiant intensity) I (I_e)　在给定方向上的立体角元内，离开点辐射源（或辐射源面元）的辐射功率除以该立体角元。

$$I=\int I_\lambda d\lambda$$

单位：$W\cdot sr^{-1}$（瓦［特］每球面度）

(11) 辐［射］亮度，辐射度 (radiance) L，(L_e)　表面上一点处的面元在给定方向上的辐射强度，除以该面元在垂直于给定方向的平面上的正投影面积。

$$L = \int L_\lambda d\lambda$$

单位：$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$（瓦［特］每球面度平方米）

（12）辐［射］出［射］度（radiant exitance）M，（M_e） 离开表面一点处的面元的辐射能通量，除以该面元面积。以前称辐射发射率（radiant emittance）。

$$M = \int M_\lambda d\lambda$$

单位：$W \cdot m^{-2}$（瓦［特］每平方米）

（13）辐［射］照度（irradiance）E，（E_e） 照射到表面一点处的面元上的辐射能通量除以该面元的面积。

$$E = \int E_\lambda d\lambda$$

单位：$W \cdot m^{-2}$（瓦［特］每平方米）

（14）曝辐［射］照度（radiance exposure）H，（H_e）。

$$H = \int E dt$$

单位：$J \cdot m^{-2}$（焦［耳］每平方米）

（15）发射率（emissivity）ε 热辐射体的辐射出射度与处于相同温度的全辐射体（黑体）的辐射出射度之比。

（16）光子数（photon number）N_p，Q_p，Q 对于频率 ν 的单色辐射。

$$N_p = W/h\nu$$

式中 W 是辐射能。

（17）光子通量（photon flux）Φ_p，Φ

$$\Phi_p = dN_p/dt$$

单位：s^{-1}（每秒）

（18）光子强度（photon intensity）I_p，I 在辐射源给定方向的立体角元内，离开辐射源或其面元的光子通量除以该立体角元。

单位：$s^{-1} \cdot sr^{-1}$（每秒球面度）

（19）光子亮度（photon luminance）L_p，L 表面一点处的面元在给定方向上的光子强度除以该面元在垂直于给定方向的平面上的正投影面积。

单位：$s^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$（每秒球面度平方米）

（20）光子出射度（photon exitance）M_p，M 离开表面一点处的面元的光子通量除以该面元的面积。

单位：$s^{-1} \cdot m^{-2}$（每秒平方米）

（21）光子照度（photon irradiance）E_p，E 照射到表面一点处的面元上的光子通量除以该面元的面积。

单位：$s^{-1} \cdot m^{-2}$（每秒平方米）

（22）曝光子量（photon exposure）H_p，H。

$$H_p = \int E_p dt$$

单位：m^{-2}（每平方米）

(23) 发光强度 (luminous intensity) I, (I_v)　发光强度是基本量之一。

$$I=\int I_\lambda \mathrm{d}\lambda$$

单位：cd 坎[德拉]，坎德拉是一光源在给定方面上的发光强度，该光源发出频率为540×10^{12}Hz 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 1/683W·sr^{-1}

(24) 光通量 (luminous flux) Φ, (Φ_v)　发光强度为 I 的光源立体角 dΩ 内的光通量。

$$\mathrm{d}\Phi=I\mathrm{d}\Omega$$

单位：lm (流 [明] 1lm=1cd·sr)

(25) 光量 (quantity of light) Q, (Q_v)　光通量对时间积分。

$$Q=\int Q_\lambda \mathrm{d}\lambda$$

单位：lm·s (流 [明] 秒)

(26) 光出射度 (luminous exitance) M, (M_v)　离开表面一点处的面元的光通量除以该面元的面积。

$$M=\int M_\lambda \mathrm{d}\lambda$$

单位：lm·m^{-2} (流 [明] 每平方米)

(27) [光] 照度 (illuminance) E, (E_v)　照射到表面一点处的面元上的光通量除以该面元的面积。

$$E=\int E_\lambda \mathrm{d}\lambda$$

单位：lx (勒 [克斯], 1lx=1lm·m^{-2})

(28) 曝光量 (light exposure) H。

$$H=\int E\mathrm{d}t$$

单位：lx·s (勒 [克斯] 秒)

(29) 入射辐射 (光) 通量 (incident flux) ϕ_0　射到介质表面的辐射 (光) 通量。

单位：W (瓦特)

(30) 透射辐射 (光) 通量 (transmitted flux) ϕ_{tr}　从介质内部出射的辐射 (光) 通量。

单位：W (瓦特)

(31) 透射 (transmission)　能保持波长不变地穿过介质的辐射现象。

(32) 透射比 (transmittance) τ　透射辐射 (光) 通量和入射辐射 (光) 通量之比。亦称透光率。

$$\tau=\frac{\phi_{tr}}{\phi_0}$$

(33) 吸光度 (absorbance) A　透射比倒数的对数。

$$A=\lg\frac{1}{\tau}$$

(34) 净吸收辐射 (光) 通量 (absorbed flux without phenomena other than absorption) ϕ_a　入射辐射 (光) 通量与透射辐射 (光) 通量之差。

$$\phi_a=\phi_0-\phi_{tr}$$

单位：W (瓦特)

(35) 吸收 (absorption)　辐射能与物质作用时，所发生的辐射能减少并使物质内能增加

的过程。

(36) 吸收比 (absorptance) α 净吸收辐射（光）通量和人射辐射（光）通量之比。

$$\alpha'=\frac{\phi_a}{\phi_0}$$

(37) 内透射比（均匀非散射层的）[internal transmittance (of a homogenous nondiffusing layer)] τ_i 到达介质的出射面的辐射（光）通量和离开入射面的辐射（光）通量之比。

(38) 内吸光度 (internal absorbance) A_i 内透射比倒数的对数。

$$A_i=\lg\frac{1}{\tau_i}$$

(39) 内吸收比（均匀非散射层的）[internal absorptance (of a homogenous nondiffusing layer)] α_i 吸收层的人射面和出射面之间净吸收的辐射（光）通量与离开人射面的辐射（光）通量之比。

第二节 光谱分析法的分类及有关定律、定义

一、光谱分析法的分类[2,3]

光谱分析法可按不同的电磁波谱区、产生光谱的基本粒子、辐射传递的情况等进行分类。表 1-1 列出不同光谱区相应的光谱分析法，表 1-2 给出了各种光谱分析法的应用范围。

表 1-1 光谱区及对应的光谱分析法

光谱区	波长范围	光谱分析法	量子化跃迁型式
γ 射线	(0.0005～0.14)nm	γ 射线光谱学；穆斯堡尔光谱学	原子核
X 射线	(0.01～10)nm	X 射线光谱学：X 射线荧光分析法、X 射线吸收分析法、X 射线散射法、X 射线光电子能谱	内层电子跃迁
真空紫外线	(10～200)nm	远紫外吸收光谱	价电子
紫外可见光	(200～780)nm	紫外光可见光吸收、发射和荧光光谱	价电子
红外线	(780～3×10^5)nm	红外光吸收光谱和拉曼散射光谱	转动/振动的分子
微波	(3×10^5～10^9)nm	微波吸收	分子的转动
电子自旋共振	3cm	电子自旋共振波谱	磁场中的电子自旋
无线电波	(0.6～10)m	核磁共振波谱	磁场中的核的自旋

表 1-2 光谱分析法的应用范围

方法名称	检出限		相对标准偏差/%	主要用途
	g（绝对）	$\mu g \cdot g^{-1}$（相对）		
原子发射光谱法		10^{-4}～10^{2}	1～20	微量多元素连续或同时测定
原子吸收光谱法	10^{-15}～10^{-9}（非火焰）	10^{-3}～10^{1}（火焰）	0.5～10	微量单元素分析等
原子荧光光谱法	10^{-15}～10^{-9}	10^{-3}～10^{1}	0.5～10	微量单元素分析等
紫外可见吸收光谱法		10^{-3}～10^{2}	1～10	有机物定性定量
分子荧光光谱法		10^{-3}～10^{4}	1～50	有机物定性定量
红外光谱法		10^{3}～10^{6}	5～20	结构分析及有机物定性定量
拉曼光谱		10^{3}～10^{6}	5～20	结构分析及有机物定性定量
核磁共振波谱法		10^{1}～10^{5}	1～10	结构分析
顺磁共振波谱法	10^{-9}～10^{-6}		半定量	结构分析
X 射线荧光法		10^{-1}～10^{2}	0.1～10	常量多元素，同时测定
俄歇电子能谱法		10^{3}～10^{5}	5～20	表面及薄层分析
穆斯鲍尔光谱法		10^{1}～10^{3}	半定量	结构分析
中子活化法		10^{-3}～10^{-1}	2～10	微量分析等
电射探针		10^{2}～10^{4}	10～50	微区分析
电子探针		10^{2}～10^{3}	5	微区分析
离子探针		10^{-1}～10^{0}	半定量	微区分析

二、光谱分析法的定律和定义[4,5]

(1) 朗伯-布格定律 (Lambert-Bouguer's law)　一束辐射 (光) 通量为 ϕ_0 的平行单色辐射，垂直入射，通过吸收介质，若该吸收介质的表面是互为平行的平面，且它内部是各向同性的、均匀的、不发光不散射的，则透射辐射 (光) 通量 ϕ_{tr} 随吸收介质的光路长度 b 的增加而按指数减少。并由下列方程表示：

$$\phi_{tr}=\phi_0 \cdot e^{-Kb}$$

式中，ϕ_{tr} 为透射辐射 (光) 通量；ϕ_0 为入射辐射 (光) 通量；b 为光路长度；e 为自然对数的底；K 为线性吸收系数。

(2) 比尔定律(Beer's law)　一束平行单色辐射，垂直入射，通过一定光路长度的吸收介质，它的透射辐射(光)通量随介质中吸收物质浓度的增加而按指数减少。并由下列方程表示：

$$\phi_{tr}=\phi_0 \cdot e^{-K_m \rho}$$

或

$$\phi_{tr}=\phi_0 \cdot e^{-K_c c}$$

式中，K_m 和 K_c 为质量线性吸收系数和摩尔线性吸收系数，在给定试验条件下是常数；ρ 为质量浓度；c 为物质的量浓度。

(3) 朗伯-布格和比尔定律的加和性 (additive nature of the laws of Lambert-Bouguer and Beer)　一束平行单色辐射，垂直入射，通过几种彼此不起反应的物质所组成的吸收介质时，若该吸收介质的入射、出射面是互为平行的平面，且它内部是各向同性的、均匀的、不发光不散射的，则该吸收介质总的吸光度等于几种特征吸光度的总和。

(4) 通用吸收定律 (general absorbance law)　将朗伯-布格和比尔两定律合并为通用吸收定律，以如下单一方程式表示：

$$\phi_{tr}=\phi_0 10^{-ab\rho} \quad 或 \quad \phi_{tr}=\phi_0 10^{-\epsilon bc}$$

式中，a 为质量吸收系数，ϵ 为摩尔吸收系数，在给定试验条件下均为常数。

(5) 厚度❶ (thickness) L　吸收池的两个平行且透光的内表平面之间的距离。

单位：mm (毫米) 或 cm (厘米)

(6) 光路长度❷ (optical path length) b　光通过吸收池内物质的入射面和出射面之间的路程。

(7) 参比辐射 (光) 通量 (reference flux) ϕ_r　单色辐射 (光) 通过参比物质，并到达检测器的辐射 (光) 通量。

单位：W (瓦特)

(8) 试样辐射 (光) 通量 (sample flux) ϕ_s　单色辐射 (光) 通过待测物质，并到达检测器的辐射 (光) 通量。

单位：W (瓦特)

(9) 百分透射率 (percentage transmittance) τ'　试样辐射 (光) 通量与参比辐射 (光) 通量之比，用百分率表示。

$$\tau'=\frac{\phi_s}{\phi_r}\times 100\%$$

---

❶ 当辐射以垂直入射时，厚度与光路长度两术语同义。

❷ 吸收物质的折射率与光路长度的乘积为光程。

(10) 部分内吸光度 (partial internal absorbance) A_p 由被测物质中部分组分引起的内吸光度，实质上是指该物质内吸光度 A_s 与参比物质内吸光度 A_r 之差。

$$A_p = A_s - A_r = \lg \frac{\phi_r}{\phi_s}$$

(11) 特征部分内吸光度 (characteristic partial internal absorbance，通称特征吸光度) A_c 由物质中某一种组分引起的部分内吸光度。

$$A_c = \lg \frac{\phi_r}{\phi_s}$$

(12) 浓度 (concentration) 溶质的量和溶液体积之比。

(13) 质量浓度 (mass concentration) ρ 溶质的质量和溶液体积之比。

单位：$kg \cdot m^{-3}$ (千克每立方米) 或 $g \cdot L^{-1}$ (克每升)

(14) 物质的量浓度 (amount-of-substance concentration) c_B 溶质的物质的量和溶液体积之比。

单位：$mol \cdot L^{-1}$ (摩尔每升)

(15) 特征部分内吸收系数 (characteristic partial internal absorbance coefficient，通称吸收系数) 被溶解的待测物质在单位浓度、单位厚度时的特征吸光度。

按照使用浓度单位的不同，可有质量吸收系数和摩尔吸收系数之分。

注：一般使用的浓度通常是被测的元素或分子的浓度。

(16) 质量吸收系数 (mass absorption coefficient) a 厚度以厘米表示、浓度以克/升表示的吸收系数。

$$a = \frac{A_c}{L \cdot \rho}$$

单位：$L \cdot cm^{-1} \cdot g^{-1}$ (升每厘米克)

(17) 摩尔吸收系数 (molar absorption coefficient) ε 厚度以厘米表示、浓度以摩尔/升表示的吸收系数。

$$\varepsilon = \frac{A_c}{L \cdot c}$$

单位：$L \cdot cm^{-1} \cdot mol^{-1}$ (升每厘米摩尔)

(18) 等吸光度点 (isosbestic point) 在某波长处，可以互相转化的两种物质的吸收系数相等或同浓度下吸光度相等，称此两种物质具有等吸光度点。

(19) 等吸收点 (isoabsorptive point) 在某波长处，两种或两种以上物质的吸收系数相等或同浓度下吸光度相等，称它们具有等吸收点。

第三节 光谱分析法仪器概述及术语

一、光谱分析法仪器概述

光谱分析法基于六种现象，即吸收、荧光、磷光、散射、发射和化学发光。其测量仪器的组成虽略有不同，但大部分的基本元件十分相似。典型光谱分析仪包含五个组件：(1) 稳定的辐射源；(2) 样品池；(3) 波长选择器或频率调制器；(4) 辐射检测器；(5) 讯号处理显示器或记录仪。五个组件的三种不同搭配方式构成了六种光谱测量的分析仪器 (见图 1-2)。

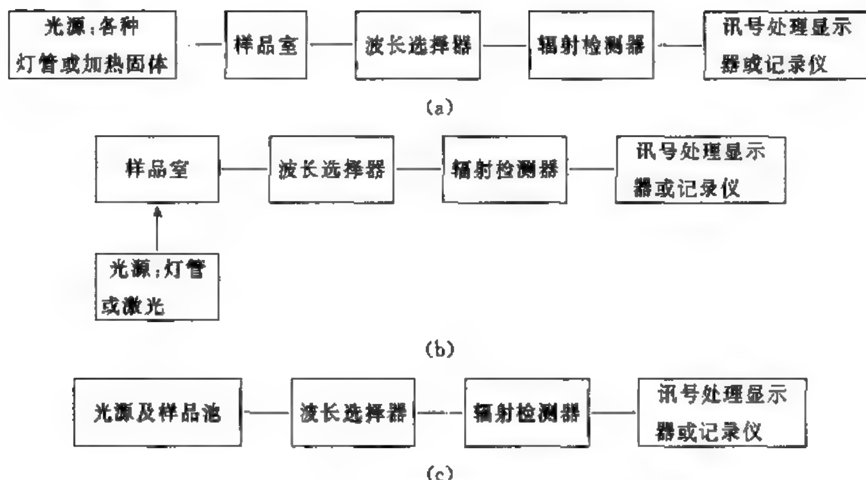


图 1-2 各种光学光谱分析仪器的组件

(a) 吸收光谱分析法;(b) 荧光、磷光及散射光谱分析法;(c) 发射和化学发光光谱分析法

图 1-2 中 (a)、(b) 两种仪器的设计方式用于吸收光谱、荧光、磷光及散射光谱的测量，均需要外来的辐射光源，用于吸收光谱时，来自光源的光束通过样品，直接到达波长选择器(在紫外可见分光光度计中，样品室和波长选择器的位置是相反的)，在 (b) 中光源发出的辐射照射试样，测量由样品发射出的特殊的荧光，磷光或是散射辐射能，因此光源与样品的位置成一角度 (一般为 90 度)。

发射光谱分析法和化学发光光谱分析法不同于以上所述的方法，不需要外来的辐射能源，由样品本身发射一定波长的光，故其仪器的设计方式如图 1-2 (c) 所示。在发射光谱分析法中，样品容器本身为弧光，火花或火焰，它不但容纳样品，并使样品发射出特殊的辐射。

二、光谱分析仪器术语[6]

(一) 特征及一般性能

(1) 光谱范围 (spectral range)　仪器能测量光谱的波长范围，它主要取决于辐射源、波长选择器和检测器。光谱范围是由能测量的光谱波长的上下极限所确定，并以纳米表示。

(2) 有效光谱范围 (effective spectral range)　在规定的不确定度范围内，仪器能进行测量的光谱范围。

(3) 工作范围 (working range)　仪器能按规定的准确度和精密度进行测量的吸光度或强度的范围。在不同光谱区域，工作范围是不同的。

(4) 仪器的不确定度 (inaccuracy of the instrument)　仪器给出的读数接近真值的能力。它是仪器的一种综合性的特性指标。用系统误差与随机误差组成的综合误差表示。在正常使用仪器情况下，能影响实验结果。可随波长、吸光度或百分透射率以及带通宽度等因素的不同而变化。

(5) 仪器的准确度 (accuracy of the instrument)　在不考虑随机误差的情况下，仪器给出的读数与被测量的真值相一致的能力。它用系统误差表示，即用同一仪器对同一被测量值进行一系列连续测定，仪器所给出的读数的算术平均值与被测量的真值或规定值之间的差值表示。

(6) 仪器的抗偏差性 (freedom from bias of the equipment)　在不考虑重复性误差的情况下，仪器给出的读数与被测量真值相一致的能力。仪器的抗偏差性是指仪器所给出的结果不

受系统误差影响的能力。它用系统偏差来表示，即对某一个量用同一仪器进行一系列连续测定过程中所得读数的算术平均值与被测量真值或公认值之间的差。

(7) 仪器的重复性 (repeatability of the equipment)　在不考虑系统误差的情况下，仪器对某一测量值能给出相一致读数的能力。它用重复性误差表示，即对某一测定量，在尽可能短的时间间隔内，以同一样品进行一系列测定所得的结果间相一致的程度。

(8) 仪器的稳定性 (stability of the equipment)　在一段时间内，仪器保持其精密度的能力。

(9) 仪器的可靠性 (reliability of the equipment)　仪器保持其所有性能（准确度、精密度和稳定性）的能力。

(二) 光谱仪器组分部件的特征及性能

(1) 通带 (bandpass)　辐射选择器从给定光源中分离出的在某标称波长或频率处的辐射范围。

(2) 光谱带宽 (spectral bandwidth)　除非另有说明，光谱带宽用通带曲线上高度（光谱强度）的二分之一处的宽度表示，一般是参照通带轮廓而定义的，如同谱线半强宽度是参照发射谱线轮廓而定义一样。

(3) 线色散率 (linear dispersion)　在光谱仪焦面上两条谱线间的距离 ΔX 与其波长差值 $\Delta\lambda$ 的比值。用 $\Delta X/\Delta\lambda$ (mm/nm) 表示。

(4) 倒线色散率 (reciprocal linear dispersion)　线色散率的倒数 ($\Delta\lambda/\Delta X$)。

单位：$nm \cdot mm^{-1}$

(5) 杂散辐射 (stray radiation)　检测器在给定标称波长处所接收的辐射线中，夹杂有不属于入射辐射（光）束的或带通之外的辐射（光）线。杂散辐射按其来源可分为内杂散辐射与外杂散辐射，按其光谱的分布可分为同色杂散辐射与异色杂散辐射。

(6) 内杂散辐射 (internal stray radiation)　沿辐射通道（经选择器、狭缝、光阑、吸收池等）所发生的反射和散射，或在光栅选择器或干涉滤光片中存在不同级的光谱而引起的杂散辐射。

(7) 外杂散辐射 (external stray radiation)　外界环境的光线引起的杂散辐射。

(8) 同色杂散辐射 (homochromatic stray radiation)　光谱带通范围内的而不属于入射辐射（光）束引起的杂散辐射。

(9) 异色杂散辐射 (heterochromatic stray radiation)　光谱带通范围外的，不属于入射辐射（光）束而引起的杂散辐射。

(10) 杂散辐射率 (level of stray radiation)　检测器接受的杂散辐射（光）通量和总辐射（光）通量之比，用百分率表示。杂散辐射率能用带通滤光片进行测定。实际测量的只是能透过滤光片的、带通范围外的两端辐射线，而不是不能透过滤光片的、带通范围内的辐射线。

(11) 分辨率 (resolution)　仪器分开相邻的两条谱线的能力。在定性上可用相邻的两条谱线中较弱的辐射（光）通量和两条谱线间最低处的辐射（光）通量之比等于或大于 2 时，则认为是两条不同的谱线。在定量上可用两条可区分的谱线波长平均值 (λ) 和它们的波长差 ($\Delta\lambda$) 之比 $\left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda}\right)$ 表示。

仪器分辨率可根据钠发射谱线 589.0nm 和 589.6nm 分开，或锰（七价）吸收峰在 525nm 和 545nm 处的分开（峰之间最低处即峰谷为 535nm），或钬盐（溶液或玻璃滤光片）吸收线的

分开来确定。

（12）波长定位的准确度（accuracy of the wavelength setting）　不考虑随机误差的情况下，仪器提高辐射波长与标称波长相一致的能力。它是用多次测定波长的算术平均值与波长标称值之间的差值表示。这一差值是随波长不同而变。

波长定位的准确度可由下列方法测定：

①对于发射谱线：借助于线光谱灯，例如紫外和可见光用汞灯；可见和近红外光用钠弧灯。

②对于吸收谱线：借助于钕、镨混合物或钬的氧化物滤光片或稀土元素的盐溶液或某些溶剂蒸气（如高纯度苯蒸气）。

（13）波长定位的重复性（repeatability of wavelength setting）　在不考虑波长定位的准确度情况下，对同一波长反复定位时，仪器给出的波长值间相互一致的能力。

（14）响应时间（response time）　当到达检测器的辐射强度改变时，检测器达到平衡状态所需的时间。

注：现代检测器的响应时间小于 0.03s。

（15）时间常数（time constant）　当辐射中断时，检测器指示下降 63.2%所需的时间。它作为检测器响应快慢的指标。

（16）光谱响应（spectral response）　检测器对各个波长的入射辐射的响应。一般的光电检测器为选择性检测器，只对一定的光谱间隔内的辐射有响应。

（17）（光栅波长选择器的）输出功率［output power (of a grating wavelength selector)］光学系统在光谱中分出谱线时，以尽可能小的强度损失提供有用辐射光束的能力。如不考虑光栅波长选择器内透射和反射的损失，可用光栅面积（mm^2）除以倒线色散率（nm/mm）表示。

第四节　有关光谱分析的国内外期刊文献介绍[7]

光谱分析文献繁多，数量庞大，包括图书（教科书、专著、论文集、会议文集及工具书等）、期刊及其检索工具、特种科技文献（技术研究报告、政府出版物、学位论文、产品产本等）及专利资料等。本节仅对涉及光谱分析的有关国内外期刊和检索工具作扼要介绍，其他的有关文献将在以后的各章中介绍。

一、文献检索工具

文献检索工具是在原始资料基础上加工编辑出版的二次文献资料，是在查找光谱分析资料时首先需要的工具书。检索工具就其著录形式来说可分为：目录、题录、文摘和文献指南四种；就其出版形式有期刊式检索工具、单卷式检索工具、附录式检索工具和卡片式检索工具。这里仅就和光谱分析有关的期刊式检索工具文摘作简要介绍。

Chemical Abstracts（化学文摘 · 简称“CA” · 美国）

它由美国化学会化学文摘社编辑出版，1907 年创刊，初为半月刊，1961 年（第 55 卷）改为双周刊。1962 年起每年出两卷，共 26 期，1967 年（第 66 卷）起改为周刊，每年 52 期，并将内容分类改为 80 类，收录世界 136 个国家与地区的一万多种期刊，28 个国家的专利目录、研究报告、学位论文和图书等。CA 有五大类 80 个“类目”（Section），其中物理和分析化学占 16 个类目，该类目在双周出版，关于每一个类目的详细介绍可参阅《主题范围指南——化

学文摘各类目主题范围与文摘编排》。CA 的索引相当完备，每期有期索引，每卷有卷索引，有累积索引。当需要系统地查找某一类光谱分析的文献时可以使用 CA。

Реферативный Журнал Химия 化学文献．（简称"РЖХ"）

1953 年创刊，半月刊，由前苏联（现俄罗斯）科学院情报研究所编辑出版。1961 年后该刊除综合册以外，还按综合册上的类名与编号出版十个分册，1965 年后增至 13 个分册，1967 年 7 月起将综合册改为每期两本。分为 13 大类，第四类是分析化学，每大类又分许多小类。其中分析化学部分又分为一般问题、无机物分析、有机物分析三个小类编排。该文摘内容全面、详尽、索引系统亦较完备，其作用和 CA 相同。

分析文摘（Analytical Abstracts. 英国）

1954 年创刊，月刊，由"The Society for Analytical Chemistry"编辑出版。该刊刊载分析化学、实验室分析仪器方面的学术论文文摘。其前身附于 1877 年创刊的"化验师"杂志中，在 1944～1953 年在《英国文摘》第三部分"分析和仪器设备"上刊载。1953 年底《英国文摘》停刊后，该刊即为《化验师》的附刊而单独出版。收录世界各国 600 多种期刊、研究报告、会议论文集和专利等。现在内容分 9 个部分编排，每年文摘量约 9000 条，每卷有著者、主题和专题索引以及累积索引。

分析化学文摘（Analytical Chemistry Abstracts. 中国）

1960 年 4 月创刊，月刊，中文，中国科学技术情报研究所创办，全国发行。原名《化学文摘（第四分册 化学分析）》，其中一部分摘自《苏联化学文摘》，另一部分摘自国内外最近科技期刊，并出版年度主题索引（1962～1964 年），1966 年并入《化学文摘》综合本，1973 年 7 月复刊，改为现名，1981 年停刊，1982 年 1 月再度复刊。复刊后分两期出版主题索引，与当年各期《分析化学文摘》配套使用。它是分析化学领域综合性科技情报检索工具。主要栏目有：一般问题、无机化学、有机化学、生物化学、药物化学、食品、农业、环境化学、仪器和技术等。编辑部地址：四川省重庆市市中区胜利路 132 号，中国科学技术情报研究所重庆分所。邮政编码：630013。

中国无机分析化学文摘（Inorganic Analytical Chemistry Abstracts of China. 中国）

1984 年 3 月创刊，季刊，中国有色金属工业总公司主办，北京矿冶研究总院编辑，冶金工业出版社出版。国内公开发行。是国内无机分析化学领域的综合性情报检索刊物。每期附有按被测元素、化合物及无机阴离子编排的索引，每年单独出版一册《主题与作者索引》。该刊以文摘、简介和题录形式收录了国内 270 种期刊、会议论文集、新书、新标准等分析化学方面的科技文献，并按分析方法分为十二大类：一般问题、重量分析与容量分析、光度法、电化学分析、光谱分析、色谱分析、物相分析、气体分析、放射化学分析、质谱分析、分离方法、贵金属分析等。编辑部地址：北京市西直门外文兴街 1 号。邮政编码：100044。

中国化学化工文摘（China Chemical Abstracts. 中国）

1983 年创刊，月刊。原名《中国化工文摘》，1993 年改名为《中国化学化工文摘》，中国化工信息中心创办，中国化学化工文摘编辑部编辑。重点收录报道中国化学化工期刊近 1000 种及有关高等院校的学报中发表的文献。全年报道化学化工信息 12000 条左右，报道内容分化学和化学工业两大部分。编辑部地址：北京市安外小关街 53 号。邮政编码：100029。

分析仪器文摘（Analytical Instrument Abstracts. 中国）

1963 年创刊，季刊，1969～1970 年停刊，1985 年改为双月刊，是分析仪器领域的综合性科技情报检索工具。内容包括光谱、色谱、质谱、电化学等分析仪器的应用论文、研究报告、

图书、技术标准及专利等，每年第 6 期附有年度索引。北京分析仪器研究所主编，编辑部地址：北京市海淀区温泉北京分析仪器研究所。邮政编码：100095。

Atomic Absorption and Emission Spectrometry Abstracts（原子吸收与发射光谱文摘．英国）

1969 年创刊，由“PRM Science and Technology Agency”编辑出版，原名“Atomic Absorption and Flame Emission Spectroscopy Abstracts”，1974 年（第 6 卷）起改为现名，双月刊，用英文出版，是国际性刊物，摘录世界各国重要期刊、会议论文和研究报告中本专业有关文献。每年文摘量约为 1000 条。附有年度主题索引、作者索引和分析元素索引。主要内容：基础理论、仪器仪表、实验技术等。

X-Ray Fluorescence Spectrometry Abstracts（X 射线荧光光谱法文摘．英国）

1970 年创刊，季刊，由“PRM Science and Technology Agency”编辑出版，以英文发表。摘录世界各国出版的有关 X 射线荧光光谱方面的期刊，会议论文集等，每期约 100 条。分类有：理论、仪器仪表、试验技术、元素分析等。附有年度主题索引和作者索引。

Laser-Raman and Infrared Spectrometry Abstracts（激光拉曼和红外光谱文摘．英国）

1972 年创刊，季刊。

和光谱分析有关的国外单卷检索工具有：

荧光文献指南（Guide to Fluorescence Literature．英国）

R. A. Passwater 编辑，Plenum Press 出版。第一卷报道 1950～1964 年 4830 条题录，1967 年出版；第二卷报道 1964～1969 年 4955 条题录，1970 年出版。

X 射线荧光分析（第一部分，目录；第二部分，索引）(X-ray Fluorescence Analysis, A Bibliography Part I；Index-Part Ⅱ)

United Kingdom Atomic Energy Authority Research Group 编辑，1966（英文）报道1957～1964 年有关文献题录 1427 条。

光谱化学分析文献索引（Index to the Literature on Spectrochimical Anaysis）

American Society for Testing and Materials 编辑，第一卷 1941 年再版，1920～1939 年题录 1446 条；第二卷 1947 年出版，1940～1945 年题录 1017 条。

二、光谱分析的主要期刊

Fresenius' Zeitschrift für Analytische Chemie（弗雷泽纽斯分析化学杂志．西德．简写：Z. Anal. Chem.）

1862 年创刊，原称“Zeitschrift für Analytische Chemie”后从 1947 年起（第 127 卷）改为现名，是由弗雷泽纽斯所创立，是世界上较早的分析化学期刊，刊载分析化学方面的原始性论文以及一般分析化学方法、设备与试剂、有机化合物的特殊应用，可见光-红外光吸收光谱、原子吸收和发射光谱分析、电化学分析等。该刊物另一重要特点是同时系统地刊载其他期刊上的有关文摘，所以又具有文摘期刊的性质，而且每卷都及时编出索引。

The Analyst（化验师．英国）

亦译“分析家”，1877 年创刊，月刊，用英文出版，小刊名为“英国分析化学会杂志”(The Analytical Journal of the Royal Society of Chemistry)，是分析化学类的国际性刊物，刊载实验室与工厂条件下现代分析方法的研究论文，同时阐述最新分析仪器，有时有评述性文章，着重注意光谱化学分析、色层分析、红外光谱分析、显微技术、活化分析、量热分析、电化

学分析、化学分析等，也有书评。

Spectrochimica Acta（光谱分析学报．英国）

1939 年创刊，月刊，“Pergamon Press Ltd.”出版，是光谱分析的国际性刊物；主要研讨原子与分子光谱分析的问题。从 1967 年起分 A 辑“分子光谱”和 B 辑“原子光谱”两辑出版。

European Spetroscopy News（欧洲光谱学新闻．英国）

1975 年创刊，双月刊。英国约翰·威廉父子公司出版。刊载光谱分析的进展和光谱分析设备新产品介绍，国际学术动态报道等。

Journal of Analytical Atomic Spectrometry（分析原子光谱法杂志．英国）

1986 年创刊，月刊，由“Royal Society of Chemistry”（英国皇家化学学会）主编。是用英文版向全世界公开发行的分析原子光谱法杂志。主要刊载内容为：原子光谱测定技术的发展与应用方面的研究论文、评论、简讯、会议消息、书评等。

Progress in Analytical Atomic Spectroscopy（分析原子光谱学进展．英国）

1978 年创刊，季刊，“Pergamon Press Ltd.”出版。该刊是评论光谱学进展的文献期刊，主要内容有原子吸收光谱法、发射光谱学、原子荧光光谱学、X 射线荧光光谱学等。

Journal of the Optical Society of American（美国光学协会杂志．美国．简写 J. O. S. A.）

1917 年创刊，月刊，1922～1929 年（第 6～19 卷）改名为“Journal of the Optical Society of American and Review of Scientific Instruments”，从 1930 年起恢复原名。美国光学协会出版。它是美国光学协会的机关刊物，刊载光学物理（如光谱学，生理光学、色视学）的实验与理论性论文。

Analytical Chemistry（分析化学．美国．简写：Anal. Chem.）

1929 年创刊，月刊，原称“Industrial and Engineering Chemistry，Analytical Edition”，自 1947 年改称现名，英文版本，由 American Chemical Society 出版，刊载有关分析化学理论与应用的研究论文、阶段成果、会议报道、科技动态、新书介绍等。每年 4 月出一期分析化学述评：奇数年为应用述评，刊登有各种工业产品分析方法新进展的总结；偶数年为基础述评，刊登各种分析方法，如发射光谱、原子吸收光谱、红外光谱、紫外光和可见光吸收光谱、分子荧光、磷光和化学发光光谱、X 射线光谱、表面分析（X 射线光电子能谱和俄歇电子能谱等)、电化学分析、气相色谱等的新成就。每年 8 月增出一册“实验室指南”。

Journal of Applied Physics（应用物理学杂志．美国）

1931 年创刊，月刊，原名“Physics”，从 1937 年（第八卷）起改为现名。美国物理协会编辑出版。刊载与物理有关的实验和理论方面的最新科研成果，以及在其他学科（如光谱学、等离子体、气体放电等）中的应用。论文课题设置 10 大类。

Applied Spectroscopy（应用光谱学．美国）

1946 年创刊，初系季刊，后改为双月刊，原名“Bulletin of the Society for Applied Spectroscopy”，从 1951 年（第六卷）起改为现名，美国应用光谱学会编辑出版，是光谱分析专业性较强的期刊文献。

Journal of Molecular Spectroscopy（分子光谱学杂志．美国）

1957 年创刊，原系双月刊，后改为月刊（9 月出 2 期)，由“Academic Press，Inc.”出版。该刊主要刊登分子光谱学方面的原始论文、研究报告等。

Atomic Spectroscopy（原子光谱学．美国）

1962 年创刊，原名“Atomic Absorption Newsletter”，1980 年 1 月起改为现名，双月刊。

由“Perkin-Elmer Corp.”编辑出版。报道内容为原子荧光、原子吸收与发射光谱等。

Applied Spectroscopy Review（应用光谱学评论．美国）

1967 年创刊，原系每年两期，从 1981 年起改为三期，“Marcel Dekker Inc.”出版。小刊名“原理、方法与应用方面的国际性刊物”，主要内容有发射光谱学，核磁共振波谱学，拉曼光谱学，红外光谱学，原子荧光光谱学等的综和评论。

Analytical Letters（分析通讯．美国．简写：Anal. Lett.）

1968 年创刊，月刊，用英文出版，小刊名为“分析化学、分析生物化学与临床化学方面快速通讯国际杂志”，主要发表光谱学、色谱学、离子交换、电化学、热分析、放射化学分析的论文和研究成果简报。现分成两辑出版，A 辑——化学分析，B 辑——临床和生物化学分析（Part A：Chemical Analysis；Part B：Clinical and Biochemical Analysis）。A 辑 B 辑交错出版。

Spectroscopy Letters（光谱学通讯．美国）

1968 年创刊，月刊，Marcel Dekker Inc. 出版。小刊名为“国际通讯杂志”，是迅速报道原子、分子光谱的实验技术和理论研究成果的杂志。内容还包括核磁共振、电子自旋共振、X 射线光谱、激光、电子显微镜、分子荧光、磷光等。来稿直接照相制版印刷，出版周期较短。

ICP Information Newsletter（ICP 信息通讯．美国）

1975 年创刊，月刊，由“Department Chemistry University of Massachusettes”（马萨诸塞州立大学化学系）编辑出版，世界公开发行。刊载的主要内容有：电感耦合等离子体在光谱化学分析中的应用和发展。

Заводская Лаборатория（工厂实验室．前苏联．简写：Зав. Лаб.）

1932 年创刊，月刊，因第二次世界大战（1942～1944 年）停刊三年，俄文出版，主要刊载实用性论文和评述等。该刊由前苏联黑色冶金部与黑色冶金科技协会中央理事会合编。每

及记事等。本刊还以英文出版。

分析化学（Analytical Chemistry. 日本.）

1952年创刊，月刊，日本分析化学会出版，本刊主要发表原始性论文与研究札记，论述或介绍分析化学方面的最新研究成果。目录有日、英对照，论文附英文摘要，每期附册 Section E，专门收载用英文发表的文章。涉及分析方法包括试剂处理、色层、可见光吸收光谱分析、电化学分析、原子吸收光谱分析、X射线分析、容量分析、红外吸收、放射化学、仪器分析、试剂改进等。试样分类有矿石、钢铁、有色金属、大气、水、放射性物质、其他无机物质、高分子、药品、生物、食品、农作物、化工燃料、有机物质等。每期还附有世界主要分析化学期刊的近期目录。每年最后一期增出："分析化学进步总说"的专号。该刊物还自1975年（第24卷）起分成两分册出版发行：一分册仍称《分析化学》，主要刊载原始论文及简报；另一分册称为《ぶんせき》（分析）。

"ぶんせき"（Japan Analyst. 分析．日本）

1975年创刊，日本分析化学会出版。该刊是从日本《分析化学》第24卷中分出的，曾作为《分析化学》每年最后一期的"分析化学进步总说"的附刊而单独出版。主要刊载讲座、综论、展望、试验报告、书评、会议报道以及国内外其他刊物论文题录和仪器介绍等。

理化检验·化学分册（Physical Testing and Chemical Analysis. PartB：Chemical Analysis. 中国）

1963年1月创刊，双月刊，以中文出版。原称"理化检验通讯"，1969年停刊，1971年复刊分为化学、物理分册出版。1980年开始按年编卷。中国机械工程学会理化检验学会和机械电子工业部上海材料研究所联合主办，是国内外发行的专业技术刊物。该刊报道国内外理化检验方面的新技术、先进经验、试验研究成果、以及各地区理化检验学术动态。设置栏目内容有研究与试验报告、工作简报、小知识、小经验、讲座、简讯等。每卷最后一期刊登全年总目录。报道的分析方法有原子吸收、发射光谱、X射线光谱、X射线荧光光谱、可见光紫外光吸收光谱，电化学分析等。分析试样有矿石、钢铁、有色金属、大气、水、放射性物质、医药品、生物、食品与农作物等。

分析化学（Analytical Chemistry. 中国）

1972年9月创刊，中文出版，目录中、英对照，主要文章都有英文摘要。中国科学院和中国化学会《分析化学》编委会编辑出版。最初为季刊，1974年起改为双月刊，1982年又改为月刊。该刊主要内容有光谱分析（包括原子吸收、发射光谱、X射线荧光）、电化学分析、发光分析、可见紫外光光谱分析、气相色谱、液相色谱等。栏目有研究报告、研究简报、仪器装置与实验技术、评述与进展、知识介绍、问题讨论等。按年编卷，每年有题目索引刊登在第12期上。

分析仪器（Analytical Instrument. 中国）

1979年创刊，季刊，分析仪器学会会刊，中国仪器仪表学会分析仪器学会和分析仪器行业协会联合主办，1985年改为公开发行。主要内容为国内外分析仪器的发展动态、分析仪器科研成果和新的应用技术、分析仪器的有关理论（包括原子吸收与发射光谱、X射线光谱、核磁共振）等。

光学与光谱技术（Optical and Spectral Technology. 中国）

1980年创刊，季刊，天津光学仪器厂主办。1986年起改由天津仪器仪表学会光谱分会主办。国内公开发行，按年编卷。主要内容有光学理论和光谱仪器的设计与制造、光谱仪器的

使用与维修等。主要栏目设置有设计与工艺、工作报告、综述、仪器与装置、经验交流、公司简介。现已停刊。

冶金分析（Metallurgical Analysis. 中国）

1981年12月创刊，双月刊，冶金工业部钢铁研究总院编辑出版。1983～1985年曾改名《冶金分析与测试·冶金分析分册》。该刊主要内容有钢铁、合金、有色金属与各种矿物原料及环境样品的仪器分析（包括原子吸收与发射光谱分析、X荧光光谱分析、色谱分析等）、化学分析、物理化学分析、相分析、气体分析等。按年编卷，附英文目录及摘要，年度主题索引登在当年最后一期上。

光谱学与光谱分析（Spectroscopy and Spectral Analysis. 中国）

1981年创刊，双月刊，原名为《原子光谱分析》，1982年改为现名，中国光学学会主办，北京大学出版社出版，全国邮局发行。该刊主要刊载原子发射与吸收光谱，X荧光光谱，分子光谱，激光光谱等方面的研究论文、分析方法、综述、基础理论等。附英文目录及英文摘要。按年编卷。

分析试验室（Analytical Laboratory. 中国）

1982年创刊，双月刊，是中国有色金属工业总公司和中国有色金属学会主办，北京有色金属研究总院承办，北京大学出版社出版。1985年以后曾改为月刊，1989年恢复双月刊，全国公开发行。刊登内容有光谱分析（原子吸收、发射光谱、荧光光谱、分子光谱等）、电化学分析、色谱分析、可见光-紫外光分光光度分析，化学分析等。该刊每年出一期评述专辑，系统地评述国内分析化学中主要课题的进展。附英文目录和摘要，按年编卷，每年最后一期刊登当年总目录。

岩矿测试（Rock and Mineral Testing. 中国）

1982年由中国地质学会岩矿测试专业委员会和中国地质科学院岩矿测试研究所创办，季刊，地质出版社出版，全国发行。原名《岩石矿物及测试》，1986年改为现名，该刊主要内容有岩矿测试技术的研究成果、动态及展望、述评、实验技术和知识介绍等。主要栏目有学术讨论、研究报告、综述、经验交流、知识讲座，学术会议简讯、读者与编者等。附英文目录及英文摘要，按年编卷，每卷最后一期登载全卷总目录，有主题索引和作者索引。

分析测试通报（Bulletin of Analysis and Testing.❶ 中国）

1982年9月创刊，双月刊，中国分析测试协会主办，广东分析测试中心编辑出版，全国发行。该刊栏目设置有研究报告、研究简报、知识介绍、讲座、经验交流、会议消息等。主要内容有光谱分析（如原子吸收、发射光谱、X射线光谱、红外光谱、拉曼光谱、以及电感耦合等离子体）、电化学分析、色谱分析等。每年第6期刊登年度题目索引和作者索引，附英文标题目录和英文摘要。

分析化学译刊（Transtate Freely Collection of Analytical Chemistry. 中国）

1984年创刊，月刊，北京大学出版社出版，报道国外化学分析和仪器分析方面的现代新成就，荟萃英、日、德、法、俄、捷、西班牙等国外化学分析方面数十种期刊精华，以综述、讲座、编译、全文翻译等方式反映世界范围内分析化学的最新成果。(1990年停刊)。

光谱实验室（Spectrolabo. 中国）

1984年9月创刊，1984、1985年为半年刊，1986、1987年为季刊，按年编卷。1989年

---

❶ 现改名为分析测试学报。

第6卷起为双月刊。原由冶金工业部钢铁研究总院学术委员会主办、清华大学出版社出版，新华书店发行的专业学术刊物。1987年由铁道部科学研究院金属及化学研究所等单位主办，1988年改由中国科学院化工冶金研究所等国务院十四部委（局院）主要直属单位主办。该刊主要刊登原子荧光、原子发射、原子吸收、X射线荧光等方面的文章；主要栏目设置：工作报告、经验交流、综述、仪器与实验技术、知识介绍、问题讨论、译文、简讯、书刊评价、研究方法论述、光谱学家故事、评介和传记等。从1988年（第5卷2辑）起，增设有关光谱、能谱分析的10个专题述评（选自美国“分析化学”的译文），报道国际最新动态。

痕量分析❶（Trace-Analysis. 中国）

1985年1月创刊，季刊，武汉大学化学系分析化学教研室编辑。武汉大学出版社出版。内容以痕量分析为主要课题，反映国内外痕量分析化学的进展和动态。分析方法包括光谱学、色谱学、电化学等现代分析技术。按年编卷，每期附英文目录和英文摘要，与外国有交流。

化学试剂（Chemical Reagents. 中国）

1979年创刊，双月刊，由化工部化学试剂科技情报站编辑出版。该刊主要报道现代化学试剂的最新应用和试剂合成，是国内有影响的杂志之一。栏目设置有研究报道与简报、专论与综述、试剂介绍、经验交流、动态以及技术市场、会议消息等。

光谱仪器与分析（Spectral Instrument and Analysis. 中国）

1990年创刊，季刊，由“北京仪器仪表学会物理光学仪器专业委员会”编辑出版。主要报道光谱仪器发展动态、光谱仪器及分析技术的综合性评论、光谱仪器的研制报告、分析方法的研究、光谱仪器新产品、测试方法及维修保养知识；新技术学术活动、难题招标、技术转让、寻求合作伙伴、问题讨论、新书出版消息和器材调剂等。

参 考 文 献

1 国家技术监督局．中华人民共和国国家标准（GB 3102—6—93）——光及有关电磁辐射的量和单位．北京：中国标准出版社，1993

2 金钦汉，任玉林，孙长青编．仪器分析．吉林：吉林大学出版社，1989

3 徐葆筠，杨根元主编，实用仪器分析．北京：北京大学出版社，1993

4 国家技术监督局．中华人民共和国国家标准（GB 8322—87）——分子吸收光谱法术语．北京：中国标准出版社，1987

5 国家技术监督局．中华人民共和国国家标准（GB 9721—88）——分子吸收分光光度法通则（紫外和可见光部分）．北京：中国标准出版社，1988

6 国家技术监督局．中华人民共和国国家标准（GB 4470—84）——火焰发射，原子吸收和原子荧光光谱分析法术语．北京：中国标准出版社，1984

7 《光谱实验室》编辑部编，主编周开亿．光谱能谱分析国际信息汇编．第二集．北京：群言出版社，1992

❶ 现改名为：分析科学学报。

第二章　发射光谱分析原理

第一节　概　　述

一、发射光谱法的分类

发射光谱分析是应用光谱学的重要分支，它对金属、合金、矿物成分的测定，以及对生产过程的控制均起着重要作用。随着电子技术、等离子体技术、激光技术和电子计算机技术的引入，发射光谱分析技术得到了迅速发展，其应用范围已扩展到高分子材料、石油化工、农业、医药、环境科学及生命科学等领域。它在现代科学技术的各个领域及国民经济的许多部门正发挥着越来越重要的作用。

发射光谱分析法根据接收特征辐射的方式不同可分为下述三种：

①目视法　通过目视观察可见光区光谱线的波长及强度以进行分析的方法。所用仪器称为看谱镜。

②摄谱分析法　用照相的方法，将经分光系统色散后的辐射能按波长顺序记录在感光板上，经显影、定影后，用光谱投影仪及测微光度计对不同特征谱线的黑度进行检测。所用仪器称为摄谱仪。

③光电直读分析法　通过在光谱仪的焦面上放置若干个出射狭缝，将待测元素特征波长的辐射能引出，用光电转换器件接收，将辐射能转变为电信号，经放大，显示读数及含量。所用仪器称为光电光谱仪。

二、发射光谱分析过程和仪器组成

发射光谱分析是根据自由原子或离子外层电子辐射跃迁得到的发射光谱来研究物质的组

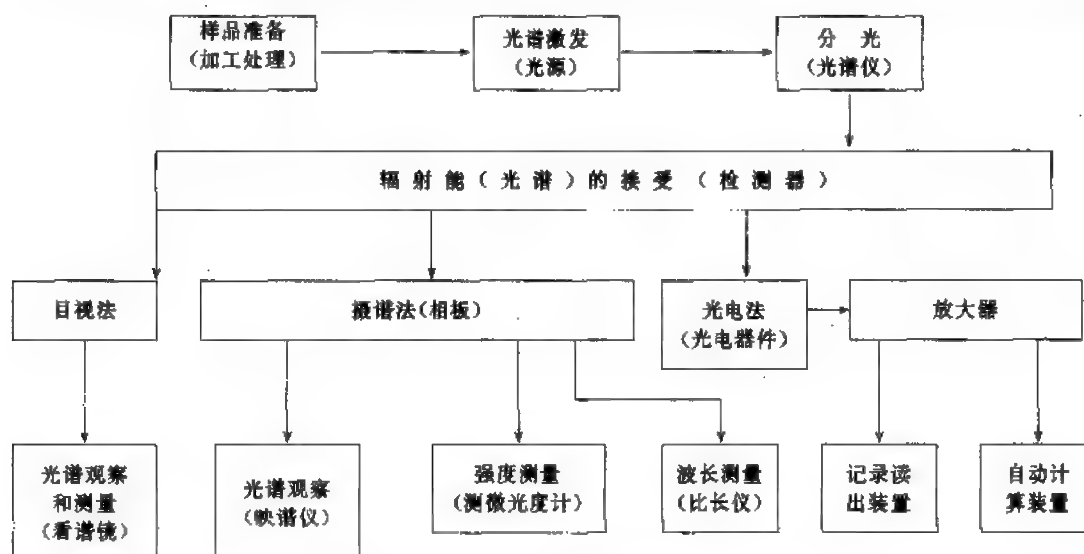


图 2-1　发射光谱分析过程及所用仪器框图

成和含量，分析过程一般分为激发、分光和检测三步。第一步是利用激发光源使试样蒸发，解离成原子，或电离成离子，然后使原子或离子得到激发，发射辐射；第二步是利用光谱仪将发射的各种波长的辐射按波长顺序展开为光谱；第三步是利用检测器对分光后得到的不同波长的辐射进行检测，由所得光谱线的波长，对物质进行定性分析，由所得光谱线的强度，对物质进行定量分析。

物质光谱的获得过程和分析过程，可以分别进行，也可同时进行，前者属于摄谱分析法，后者属目视及光电直读分析法。

发射光谱仪器通常包括光源，分光系统和检测系统三部分，摄谱分析仪器还应包括观察光谱、测定波长和强度的仪器。发射光谱分析过程及所用主要仪器框图，如图 2-1 所示。

第二节　发射光谱分析的基本理论

一、原子状态与原子光谱项

原子光谱是原子内部运动的一种客观反映，原子光谱的产生与原子结构密切相关，光谱分析就是利用各种元素原子结构彼此不同的特点，来确定物质的组成。

在原子光谱中主要是研究原子外层电子能级的跃迁，对于含有多个外层电子的原子，则需考虑原子外层电子之间的相互作用，此时整个原子的运动状态，可用四个量子数 n、L、S、J 来描述，分别称为主量子数，总轨道角动量量子数，总自旋角动量量子数和总角动量量子数。当 n、L、S、J 确定时，原子便处于某一确定的状态；反之，任何一个量子数的改变，均会引起相应原子能量的变化。

在原子光谱中，常用符号 $n^{2S+1}L_J$ 来表示原子所处的能级，此符号称为光谱项。符号 L 左上角的“$2S+1$”称为光谱项的多重性。当 $L>S$ 时，由 L 和 S 所确定的每一个光谱项，将有 $2S+1$ 个具有不同 J 值的光谱支项。由于 J 值不同的支项，其能量差别极小，因而由它们产生的诸光谱线，波长极相近，称为多重线系。

把原子中所有各种可能存在状态的光谱项，用图解的形式表示即为原子能级图。能级图中，并不是所有谱项间的跃迁都是允许的，只有符号光谱选律，即 $\Delta n=0$ 或任意正整数，$\Delta L=\pm1$，$\Delta S=0$，$\Delta J=0$ 或 ±1 的跃迁，才是允许的。凡由激发态向基态直接跃迁的谱线称为共振线，由第一激发态与基态直接跃迁的谱线称为第一共振线。那些不符合光谱选律的谱线，称为禁戒跃迁线。

原子在能级 j 和 i 之间的跃迁、发射或吸收辐射的频率与始末能级之间的能量差成正比。

$$\nu_{ji}=\frac{1}{h}(E_j-E_i) \tag{2-1}$$

式中，E_j和 E_i分别为跃迁的始末两个能级的能量，h 为普朗克常数（6.623×10^{-34}J·s）。如果 $E_j>E_i$，则为发射；如果 $E_j<E_i$，则为吸收。根据 $\lambda=\frac{c}{\nu}$，则从能级 j 到 i 跃迁的辐射波长可表示为

$$\lambda_{ji}=\frac{ch}{E_j-E_i} \tag{2-2}$$

由此可见，对应于一定能级间的跃迁，原子发射或吸收一定波长的辐射。

二、原子光谱的规律性

1. 激发能和电离能变化规律

原子序数 ---------- 26
元素符号 ---------- Fe
第一电离能(eV) ---------- 7.870
第一共振线激发能(eV) ---------- 3.3

																1 H 13.598 10.15	2 He 24.587 21.13
3 Li 5.392 1.84	4 Be 9.322 5.25											5 B 8.293 4.97	6 C 11.260 7.46	7 N 14.534 10.88	8 O 13.618 9.48	9 F 17.422 12.98	10 Ne 21.564 16.64
11 Na 5.139 2.10	12 Mg 7.646 4.33											13 Al 5.985 3.13	14 Si 8.151 4.93	15 P 10.486 6.96	16 S 10.360 6.83	17 Cl 12.967 9.16	18 Ar 15.759 11.78
19 K 4.341 1.61	20 Ca 6.113 2.92	21 Sc 6.54 3.18	22 Ti 6.82 3.32	23 V 6.74 3.12	24 Cr 6.766 2.90	25 Mn 7.435 3.06	26 Fe 7.870 3.3	27 Co 7.86 4.00	28 Ni 7.635 3.64	29 Cu 7.726 3.80	30 Zn 9.394 5.77	31 Ga 5.999 3.06	32 Ge 7.899 4.83	33 As 9.81 6.53	34 Se 9.752 6.30	35 Br 11.814 8.29	36 Kr 13.999 9.99
37 Rb 4.177 1.58	38 Sr 5.695 2.68	39 Y 6.38 2.7	40 Zr 6.84 3.58	41 Nb 6.88 3.17	42 Mo 7.099 3.25	43 Tc 7.28 —	44 Ru 7.37 3.53	45 Rh 7.46 3.59	46 Pd 8.34 4.44	47 Ag 7.576 3.66	48 Cd 8.993 5.39	49 In 5.786 3.01	50 Sn 7.344 4.8	51 Sb 8.641 5.97	52 Te 9.009 5.76	53 I 10.451 —	54 Xe 12.130 8.40
55 Cs 3.894 1.45	56 Ba 5.212 2.23	57 La～Lu 5.577 2.48	72 Hf 7.0 4.31	73 Ta 7.89 >3.7	74 W 7.98 3.2	75 Re 7.88 3.57	76 Os 8.7 4.24	77 Ir 9.1 4.81	78 Pt 9.0 4.0	79 Au 9.225 5.08	80 Hg 10.437 6.67	81 Tl 6.108 3.27	82 Pb 7.416 4.38	83 Bi 7.289 4.02	84 Po 8.42 —	85 At 9.4 —	86 Rn 10.748 6.91
87 Fr 4.0	88 Ra 5.279 2.56	89 Ac～Lr 6.9 —															

易激发易电离元素（第一电离能＜6.11eV）

中等激发电离元素（第一电离能～8.5eV）

难激发电离元素（第一电离能＞8.5eV）

图 2-2　元素激发电离难易与周期表位置的关系

所谓激发能是指气态自由原子或离子，由基态跃迁到激发态所需的能量。电离能是指从气态中性原子基态最低能级移去电子至电离状态所需的能量，移去一个电子所需能量称第一电离能，移去两个、三个……电子所需能量相应称为第二，第三……电离能。

激发能和电离能的高低是原子、离子结构的固有特征，与外界条件无关，是衡量元素激发和电离难易程度以及决定灵敏光谱线类型的重要尺度，其高低取决于原子及离子外围电子与原子核间作用力的大小。因此对原子的激发和电离而言，元素周期表中同一周期元素，由左向右，随着核电荷数、外层电子数的增多和原子半径减小，激发能和电离能依次增大。周期表中同族元素，自上而下，随着核电荷数增多，原子半径增大，激发能及电离能依次减小。不同元素激发和电离的难易程度与周期表位置的关系如图 2-2 所示。

从图 2-2 可见，不同元素具有不同的激发能与电离能，因此在实际光谱分析中，应根据被分析元素激发与电离的难易程度，选择最适宜的激发光源和激发条件。

2. 元素灵敏线类型和波长分布

在原子光谱分析中，通常是根据元素灵敏线进行元素的检出和测定。元素灵敏线的类型及其波长分布，同样与原子或离子的能级结构间存在规律性联系。实践证明，碱金属和除碱土金属外的其他主族元素，其灵敏线多为原子线；而碱土金属和除了铜分族及锌分族外的过渡元素，其灵敏线既可以是原子线，亦可以是一级离子线，甚至后者比前者更为灵敏；而铜分族和锌分族元素的原子线一般比离子线灵敏。

灵敏线的波长取决于参加辐射跃迁的高低能级的能量差，很明显，越易激发的元素，其灵敏线波长越长，越难激发的元素，其灵敏线波长越短。对于多数易激发元素，其灵敏线多分布于近红外及可见区，难激发非金属元素灵敏线多分布于远紫外区，而绝大多数具有中等激发能的元素，其灵敏线则分布于近紫外区。周期表中各元素最灵敏原子线波长分布如图 2-3 所示。

在实际发射光谱分析工作中，需根据欲分析元素灵敏线所在光谱区域，正确选择最适宜的光谱仪及相应的检测装置。

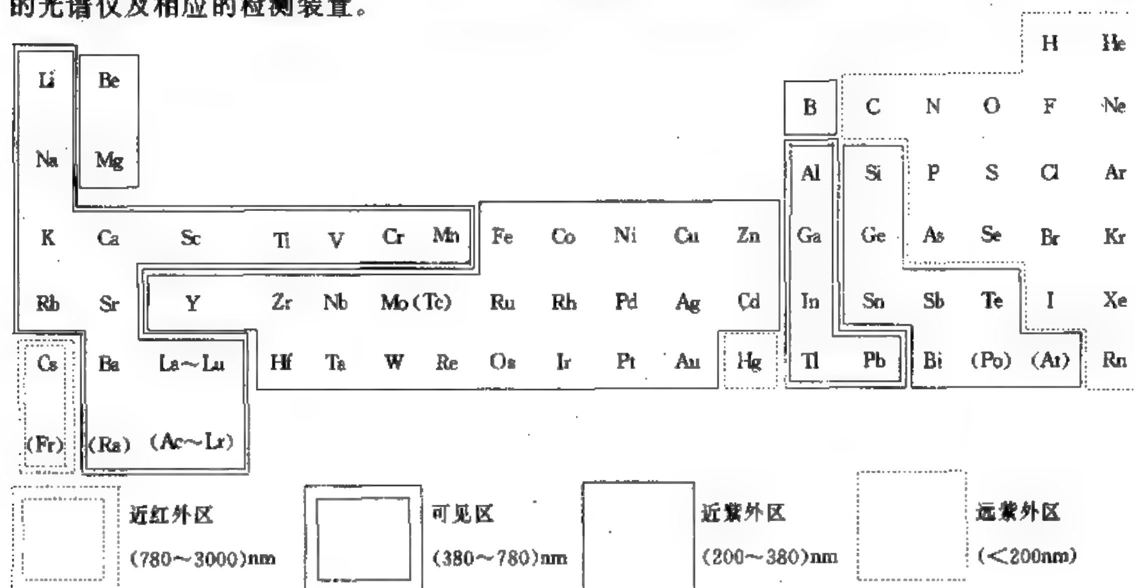


图 2-3 元素最灵敏原子线波长与周期表位置的关系

注：镧系和锕系元素中部分元素的灵敏线在近紫外区

3. 分析物的蒸发、原子化、激发和电离行为与元素周期律的关系

不同元素的蒸发、原子化、激发和电离行为是极不相同的，这主要是因为它们具有不同

表 2-1 原子和离子

原子序数	元素	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1	H	13.598								
2	He	24.587	54.416							
3	Li	5.392	75.638	122.451						
4	Be	9.322	18.211	153.893	217.713					
5	B	8.293	25.154	37.930	259.368	340.217				
6	C	11.260	24.383	47.887	64.492	392.077	489.981			
7	N	14.534	29.601	47.448	77.472	97.888	552.057	667.029		
8	O	13.618	35.116	54.934	77.412	113.896	138.116	739.315	871.387	
9	F	17.422	34.970	62.707	87.138	114.240	157.161	185.182	953.886	1103.089
10	Ne	21.564	40.962	63.45	97.11	126.21	157.93	207.27	239.09	1195.797
11	Na	5.139	47.286	71.64	198.91	138.39	172.15	208.47	264.18	299.87
12	Mg	7.646	15.035	80.143	109.241	141.26	186.50	224.94	265.90	327.95
13	Al	5.985	18.828	28.447	119.99	153.71	190.47	241.43	284.59	330.21
14	Si	8.151	16.345	33.492	45.141	166.77	205.05	246.52	303.17	351.10
15	P	10.486	19.725	30.18	51.37	65.023	230.43	263.22	309.41	371.73
16	S	10.360	23.33	34.83	47.30	72.68	88.049	280.93	328.23	379.10
17	Cl	12.967	23.81	39.61	53.46	67.8	98.03	114.193	348.28	400.05
18	Ar	15.759	27.629	40.74	59.81	75.02	91.007	124.319	143.456	422.44
19	K	4.341	31.625	45.72	60.91	82.66	100.0	117.56	154.86	175.814
20	Ca	6.113	11.871	50.908	67.10	84.41	108.78	127.7	147.24	188.54
21	Sc	6.54	12.80	24.76	73.47	91.66	111.1	138.0	158.7	180.02
22	Ti	6.82	13.58	27.491	43.266	99.22	119.36	140.8	168.5	193.2
23	V	6.74	14.65	29.310	46.707	65.23	128.12	150.17	173.7	205.8
24	Cr	6.766	16.50	30.96	49.1	69.3	90.56	161.1	184.7	209.3
25	Mn	7.435	15.640	33.667	51.2	72.4	95	119.27	196.46	221.8
26	Fe	7.870	16.18	30.651	54.8	75.0	99	125	151.06	235.44
27	Co	7.86	17.06	33.50	51.3	79.5	102	129	157	186.13
28	Ni	7.635	18.168	35.17	54.9	75.3	108	133	162	193
29	Cu	7.726	20.292	36.83	55.2	79.9	103	139	166	199
30	Zn	9.394	17.964	39.722	59.4	82.6	108	134	174	203
31	Ga	5.999	20.51	30.71	64					
32	Ge	7.899	15.934	34.22	45.71	93.5				
33	As	9.81	18.633	28.351	50.13	62.63	127.6			
34	Se	9.752	21.19	30.820	42.944	68.3	81.7	155.4		
35	Br	11.814	21.8	36	47.3	59.7	88.6	103.0	192.8	
36	Kr	13.999	24.359	36.95	52.5	64.7	78.5	111.0	126	230.39
37	Rb	4.177	27.28	40	52.6	71.0	84.4	99.2	136	150
38	Sr	5.695	11.030	43.6	57	71.6	90.8	106	122.3	162
39	Y	6.38	12.24	20.52	61.8	77.0	93.0	116	129	146.52
40	Zr	6.84	13.13	22.99	34.34	81.5				
41	Nb	6.88	14.32	25.04	38.3	50.55	102.6	125		
42	Mo	7.099	16.15	27.16	46.4	61.2	68	126.8	153	
43	Tc	7.28	15.26	29.54						
44	Ru	7.37	16.76	28.47						
45	Rh	7.46	18.08	31.06						
46	Rd	8.34	19.43	32.93						
47	Ag	7.576	21.49	34.83						
48	Cd	8.993	16.908	37.48						

的电离能/eV[1]

X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX
1362.164									
1465.091	1648.659								
367.53	1761.802	1962.613							
398.57	442.07	2085.983	2304.080						
401.43	476.06	523.50	2437.676	2673.108					
424.50	479.57	560.41	611.85	2816.943	3069.762				
447.09	504.78	564.65	651.63	707.14	3223.836	3494.099			
455.62	529.26	591.97	656.69	749.74	809.39	3658.425	3946.193		
478.68	538.95	618.24	686.09	755.73	854.75	918	4120.778	4426.114	
503.44	564.13	629.09	714.02	787.13	861.77	968	1034	4610.955	4933.931
211.270	591.25	656.39	726.03	816.61	895.12	974	1087	1157	5129.045
225.32	249.832	685.89	755.47	829.79	926.00				
215.91	265.23	291.497	787.33	861.33	940.36				
230.5	255.04	308.25	336.267	895.58	974.02				
244.4	270.8	298.0	355	384.30	1010.64				
248.3	286.0	314.4	343.6	404	435.34				
262.1	290.4	330.8	361.0	392.2	457	489.5	1266.1		
276	305	336	379	411	444	512	546.8	1403.0	
224.5	321.2	352	384	430	464	499	571	607.2	1547
232	266	368.8	401	435	484	520	557	633	671
238	274	310.8	419.7	454	490	542	579	619	698
277.1									
177	324.1								
191	206	374							

原子序数	元素	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
49	In	5.786	18.869	28.03	54					
50	Sn	7.344	14.632	30.502	40.734	72.28				
51	Sb	8.641	16.53	25.3	44.2	56	108			
52	Te	9.009	18.6	27.96	37.41	58.75	70.7	137		
53	I	10.451	19.131	33						
54	Xe	12.130	21.21	22.1						
55	Cs	3.894	25.1							
56	Ba	5.212	10.004							
57	La	5.577	11.06	19.175						
58	Ce	5.47	10.85	20.20	36.72					
59	Pr	5.42	10.55	21.62	38.95	57.45				
60	Nd	5.49	10.72							
61	Pm	5.55	10.90							
62	Sm	5.63	11.07							
63	Eu	3.6	11.25							
64	Gd	6.14	12.1							
65	Tb	5.85	11.52							
66	Dy	5.93	11.67							
67	Ho	6.02	11.80							
68	Er	6.10	11.93							
69	Tm	6.18	12.05	23.71						
70	Yb	6.254	12.17	25.2						
71	Lu	5.426	13.9							
72	Hf	7.0	14.9	23.3	33.3					
73	Ta	7.89								
74	W	7.98								
75	Re	7.88								
76	Os	8.7								
77	Ir	9.1								
78	Pt	9.0	18.563							
79	Au	9.225	20.5							
80	Hg	10.437	18.756	34.2						
81	Tl	6.108	20.428	29.83						
82	Pb	7.416	15.032	31.937	42.32	68.8				
83	Bi	7.289	16.69	25.56	45.3	56.0	88.3			
84	Po	8.42								
85	At	9.4								
86	Rn	10.748								
87	Fr	4.0								
88	Ra	5.279	10.147							
89	Ac	6.9	12.1							
90	Tb	6.2	11.5	20.0	28.8					
91	Pa									
92	U	~6.2								
93	Np									
94	Pu	5.8								
95	Am	6.0								

续表

X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX

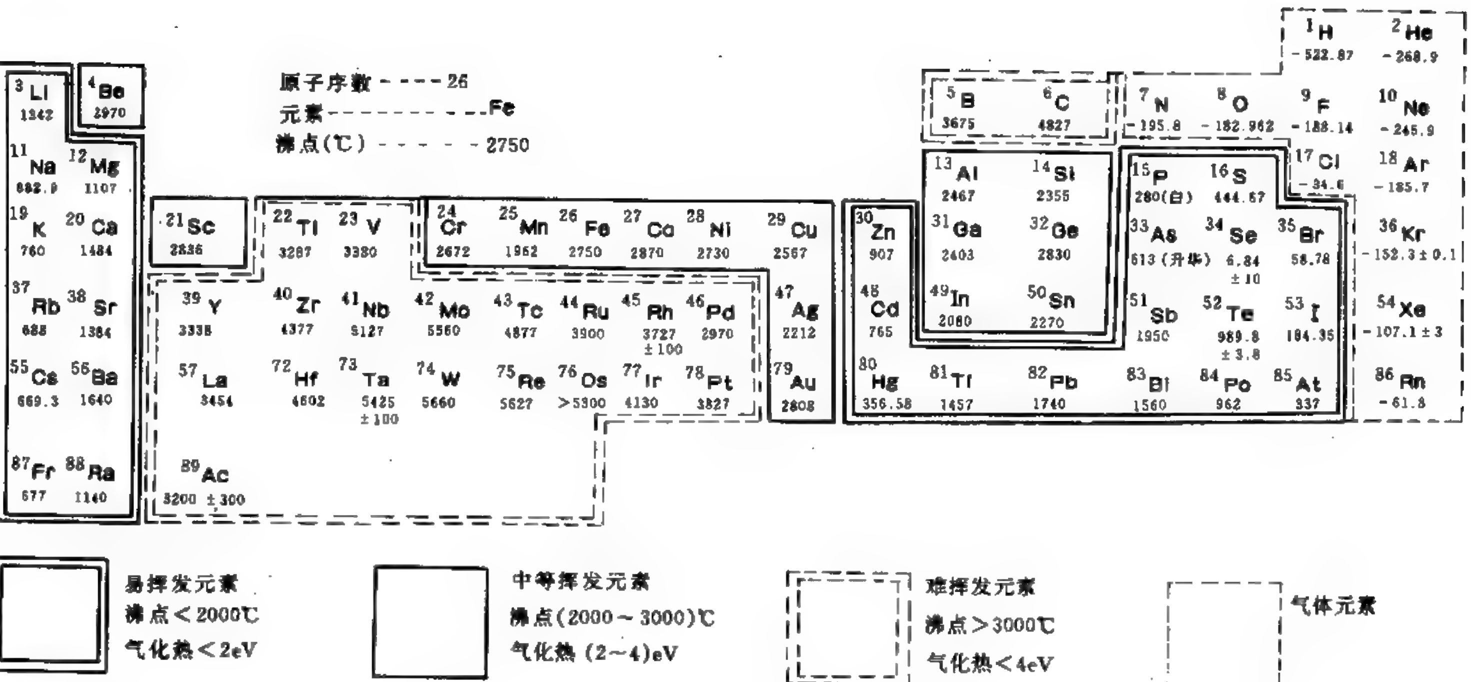


图 2-4　元素挥发性与周期表位置的关系

的沸点、离解能、激发能和电离能所致。元素的电离能、激发能、沸点和化合物的离解能也是元素原子序数的周期性函数。电离能和激发能的变化规律前已述及，此处主要介绍元素沸点（气化热）的变化规律。

物质的沸点，主要取决于化学键类型，离子极化作用和分子间作用力的大小。以离子键和原子键结合的晶体，其沸点较高；而以分子间作用力结合的晶体，其沸点较低。通常可以根据元素的沸点及挥发行为，将其分为以下 4 类：

气体元素　常温下为气态，分布在周期表的右上角；

易挥发元素　沸点低于 2000℃，如碱金属，碱土金属等；

难挥发元素　沸点高于 3000℃，主要是一些中间过渡元素；

中等挥发元素　沸点位于 (2000～3000)℃之间，周期表中其他元素均属于此类。

这 4 类元素在周期表中的位置如图 2-4 所示。

表 2-1 为原子和离子的电离能，表 2-2 为元素及其化合物的熔点、沸点和分子离解能。

表 2-2　元素及其化合物的熔点、沸点和分子离解能

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $\theta_{B.P.}$/℃	键	离解能	
				kJ·mol⁻¹	eV
Ac	1050	3200±300	—	—	—
Ag	961.93	2212	Ag—Ag	159	1.6
Ag_2O	230(d)[①]	—	Ag—O	238	2.5
AgF	435	≈1159	Ag—F	351	3.6
AgCl	455	1550	Ag—Cl	314	3.3
AgI	558	1506	Ag—I	287.4	3.0
Ag_2S	825	d	Ag—S	217.2	
AgBr	432	>1300(d)	Ag—Br	289	3.0
Al	660.37	2467	Al—Al	163	1.7
Al_2O_3	2072	2980	Al—O	481	5.0
AlN	>2200(N_2 中)	2000(s)	Al—N	293	3.0
AlF_3	1291	>2467(s)	F_2Al—F	544	5.6
$AlCl_3$	190(0.25MPa)	177.8(s)	Cl_2Al—Cl	372	3.9
$AlBr_3$	97.4	263.3	Al—Br	439	4.6
AlI_3	191	360	Al—I	364	3.8
Am	994±4	2607	—	—	—
Ar	−189.2	−185.7	Ar—Ar	4.73	0.05
As	817(2.8MPa)	613(s)	As—As	380	3.9
As_2O_3	312.3	457.2	As—O	477	4.9
AsH_3	−116.3	−55	As—H	270	2.8
AsF_3	−8.5	−63	As—F	410	4.2
$AsCl_3$	−8.5	130.2	As—Cl	444	4.6
AsI_3	146	403	As—I	296.6	3.1
As_2S_3	300	707	As—S	≈482	≈5.0
At	302	337	At—At	≈80	≈0.83
Au	1064.43	2808±2	Au—Au	215.5	2.2
Au_2O_3	−0.160	−30.250	Au—O	221.8	2.3
$AuCl_3$	254(d)	265(s)	Au—Cl	289	3.0
Au_2S_3	197(d)	—	Au—S	415	4.3
B	2300	(3675)	B—B	293	3.0
B_2O_3	45±2	≈1860	B—O	782	8.1
B_4C	2350	>3500	B—C	444	4.6
BBr_3	−46	91.3±0.25	B—Br	433	4.5
BF_3	−126.7	−99.9	F_2B—F	557	5.8
BCl_3	−107.3	12.5	B—Cl	531	5.5
Ba	725	1640	—	—	—
BaO	1918	≈2000	Ba—O	561	5.8
BaF_2	1355	2137	FBa—F	586	6.1
$BaCl_2$(α)	962	1560	ClBa—Cl	456	4.7

续表

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $\theta_{B.P.}$/℃	键	离解能	
				kJ·mol^{-1}	eV
$BaCl_2(\beta)$	963				
Be	1278±5	2970	Be—Be	58	0.6
BeO	2350±30	≈3900	Be—O	444	4.6
Be_2N_3	2200±100	2240(d)	—	—	—
BeF_2	545	800(s)	FBe—F	690	7.2
$BeCl_2$	405	520	ClBe—Cl	536	5.6
Bi	271.3	1560±5	Bi—Bi	192	2.0
Bi_2O_3	825±3	1890	Bi—O	356	3.7
$BiBr_3$	218	453	Bi—Br	264	2.7
BiF_3	727	—	Bi—F	255	2.6
$BiCl_3$	230~232	447	Bi—Cl	301	3.1
BiI_3	408	≈500	Bi—I	242	2.5
Bi_2S_3	680(在 CO_2 中)	—	Bi—S	289	3.0
Bk	1285	2970	—	—	—
Br_2	−7.2	58.78	Br—Br	192.807	2.0
C	3650	3930	C—C	602	6.2
CO	−199	−191.5	C—O	1071.9	11.1
CN_2	−27.9	−20.7	C—N	730.1	7.6
CH_4	−182.48	−164	C—H	335	3.5
CCl_4	−23	76.8	C—Cl	396	4.1
CS_2	−110.8	46.3	C—S	757	7.8
Ca	839±2	1484	Ca—Ca	15	0.155
CaO	2614	2850	Ca—O	460	4.8
CaF_2	1423	≈2500	FCa—F	548	5.7
$CaCl_2$	782	>1600	ClCa—Cl	431	4.5
$CaBr_2$	742	1815	—	—	—
CaI_2	784	≈1100	Ca—I	289	3.0
Cd	320.9	765	Cd—Cd	12	0.12
CdO	>1500	1559(s)	Cd—O	368	3.8
CdF_2	1100	1758	Cd—F	309	3.2
$CdCl_2$	568	960	Cd—Cl	206	2.14
$CdBr_2$	567	863	—	—	—
CdI	387	796	Cd—I	138	1.43
CdS	—	1380(s)	Cd—S	203	2.1
Ce	798	3443	Ce—Ce	241	2.5
CeO_2	2000	>3000	Ce—O	791	8.2
CeC	—	>2300	Ce—C	453	4.7
CeF_3	1460	2300	Ce—F	579	6.0
$CeCl_3$	848	1727	—	—	—
$CeI_3·9H_2O$	752	1397	—	—	—
Cl_2	−100.98	−34.6	Cl—Cl	239.7	2.5
Co	1495	2870	Co—Co	163	1.7
CoO	1795±20	—	Co—O	367	3.8
CoF_2	≈1200	1400	Co—F	434	4.5
$CoCl_2$	724(在 HCl 气中)	1049	Co—Cl	396	4.1
Co_2S_3	480(d)	—	Co—S	347	3.6
Cr	1857±20	2672	Cr—Cr	<167	<1.7
Cr_2O_3	2266±25	4000	Cr—O	423	4.4
Cr_3C_2	1980	3800	—	—	—
CrF_3	>1000	1100~1200(s)	Cr—F	385	4.0
$CrCl_3$	≈1150	1300(s)	Cr—Cl	360	3.8
Cs	28.40±0.01	669.3	Cs—Cs	42	0.4
Cs_2O	490(在 N_2 中)	—	Cs—O	299	3.1
Cs_2O_2	400	—	Cs—O	299	3.1
CsF	682	1251	Cs—F	502	5.2
CsCl	645	1290	Cs—Cl	435	4.5
CsBr	636	1300	Cs—Br	416.3	4.3
CsI	626	1280	—	—	—
Cu	1083.4±0.2	2567	Cu—Cu	190.4	2.0

续表

元素及化合物	熔点 $\theta/℃$	沸点 $\theta_{B.P.}/℃$	键	离解能	
				kJ·mol⁻¹	eV
CuO	1326	1800	Cu—O	473	4.9
Cu_2F_2	908	1100(s)	Cu—F	293	3.0
CuF_2	950(d)	—	FCu—F	366	3.8
$CuCl_2$	620	993(d)	Cu—Cl	347	3.6
$CuCl$	430	1490	Cu—Cl	347	3.6
$CuBr$	492	1345	Cu—Br	326	3.4
CuI	605	1290	Cu—I	192	2
Dy	1412	2567	—	—	—
Dy_2O_3	2340±10	—	Dy—O	628	6.5
DyF_3	1360	>2200	Dy—F	548	5.7
$DyCl_3$	718	1500	—	—	—
$DyBr_3$	881	1480	—	—	—
DyI_3	955	1320	—	—	—
Er	1529	2868	—	—	—
Er_2O_3	—	3000	Er—O	636	6.6
ErF_3	1350	2200	Er—F	586	6.1
$ErCl_3\cdot 6H_2O$	774	1500	—	—	—
ErI_3	1020	1280	—	—	—
Eu	822	1527	Eu—Eu	29	0.3
EuF_3	1390	2280	Eu—F	548	5.7
$EuCl_2$	727	>2000	Eu—Cl	~328	~3.4
$EuBr_2$	677	1880	—	—	—
EuI_2	527	1580	—	—	—
F_2	−219.62	−188.14	F—F	154.8	1.6
Fe	1535	2750	Fe—Fe	96	1.0
FeO	1369±1	—	Fe—O	414	4.3
Fe_2O_3	1565	2000(s)	Fe—O	414	4.3
FeF_3	>1000	—	—	—	—
$FeCl_2$	672	1030	Fe—Cl	347	3.6
$FeCl_3$	306	315(d)	Fe—Cl	347	3.6
Ga	29.78	2403	Ga—Ga	113	1.2
Ga_2O_3	1900(α) 1795±15(β)	>1900(s)	Ga—O	247	2.6
GaF_3	800(s)(在 N_2 中)	≈1000	Ga—F	602	6.2
$GaCl_2$	164	535	Ga—Cl	477	4.9
$GaCl_3$	77.9±0.2	201.3	Ga—Cl	477	4.9
$GaBr_3$	121.5±0.6	278.8	Ga—Br	435	4.5
GaI_3	212±1	345(s)	Ga—I	351	3.6
Gd	1313	3273	—	—	—
Gd_2O_3	2330±20		Gd—O	715	7.4
GdF_3	1377	2277	Gd—F	649	6.7
$GdCl_3$	609	1597	—	—	—
GdI_3	926	1340	—	—	—
Ge	937.4	2830	Ge—Ge	272	2.8
GeO_2	1115±4	—	Ge—O	669	6.9
GeH_4	−165	−88.5	Ge—H	318	3.3
GeF_4	−37	−15(s)	Ge—F	484	5.0
$GeCl_4$	−49.5	84	Ge—Cl	339	3.5
$GeBr_4$	26.1	186.5	Ge—Br	251	2.6
GeI_4	144	440(d)	—	—	—
GeS	530	430(s)	Ge—S	556	5.8
H_2	−259.19	−252.76	H—H	432.00	4.5
He	−272.2	−268.9	He—He	3.8	0.04
Hf	2227±20	4602	—	—	—
HfC	≈3890	—	Hf—C	540	5.6
HfN	3305	—	Hf—N	531	5.5
$HfCl_4$	319(s)	—	—	—	—
$HfBr_4$	420(s)	—	—	—	—
HfO_2	2578±25	5400	Hf—O	774	8.0

续表

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $\theta_{B.P.}$/℃	键	离解能	
				kJ·mol⁻¹	eV
Hg	−38.87	356.58	Hg—Hg	17	0.18
HgO	400	500(d)	Hg—O	221.1	2.3
HgO_2	2758	≈5400	Hg—O	791	8.2
HgF_2	645(d)	650	Hg—F	130	1.3
$HgCl_2$	276	302	Hg—Cl	96	1.0
$HgBr_2$	236	322	Hg—Br	68.6	0.7
HgI_2	259	354	Hg—I	34	0.4
HgS	583.5	—	Hg—S	268	2.8
Ho	1474	2700	Ho—Ho	84	0.87
HoF_3	1143	>2200	Ho—F	561	5.8
$HoCl_3$	718	1500	—	—	—
$HoBr_3$	914	1470	—	—	—
HoI_3	989	1300	—	—	—
I_2	113.5	184.35	—	152	1.58
In	156.61	2080	In—In	100	1.0
In_2O_3	1910±10	>850(v)	In—O	105	1.1
InF_3	1170±10	>1200	In—F	523	5.4
InCl	225±1	608	In—Cl	435	4.5
$InCl_2$	235	550~570	In—Cl	435	4.5
$InCl_3$	586	600(v)	In—Cl	435	4.5
InI	351	711~715	In—I	339	3.5
Ir	2410	4130	—	—	—
IrO_2	1100	>1100(d)	Ir—O	347	3.6
IrF_6	44.4	53	—	—	—
$IrCl_3$	763(d)	—	—	—	—
K	63.25	760	K—K	57	0.59
K_2O	500	>500(d)	K—O	241	2.5
KOH	360.4±0.7	1320~1324	K—OH	339	3.5
KF	858	1505	K—F	490	5.1
KCl	770	1500(s)	K—Cl	423	4.4
KBr	734	1435	K—Br	378.7	3.9
KI	681	1330	K—I	326	3.4
Kr	−156.6	−152.30±0.10	Kr—Kr	5.23	0.054
La	920	3470	La—La	241.0	2.5
La_2O_3	2317	4197	La—O	782	8.1
LaC_2	2356	—	La—C	502	5.2
LaF_3	1427	2327	La—F	598	6.2
$LaCl_3$	872	>1747	—	—	—
LaI_3	772	—	—	—	—
La_2S_3	2100~2150	—	La—S	573	5.9
Li	180.34	1342	Li—Li	109	1.1
Li_2O	>1700	2327	Li—O	335	3.4
LiF	845	1676	Li—F	573	5.9
LiCl	605	1325~1360	Li—Cl	464	4.8
LiBr	550	1265	Li—Br	418	4.3
LiI	449	1180±10	Li—I	347	3.6
Lu	1663	3402	Lu—Lu	145	1.5
LuF_3	1182	220	Lu—F	569	5.9
$LuCl_3$	905	750(s)	—	—	—
$LuBr_3$	1400	—	—	—	—
LuI_3	1050	1200	—	—	—
Mg	648.8	1107	Mg—Mg	8.55	0.0886
MgO	2852	3600	Mg—O	377	3.9
Mg_3N_2	800(d)	—	—	—	—
MgF_2	1261	2239	FMg—F	577	6.0
$MgCl_2$	714	1412	ClMg—Cl	322	3.3
Mn	1244±3	1962	Mn—Mn	<88	<0.9
MnO	1785	3100±100	Mn—O	402	4.2
Mn_3O_4	1564	—	Mn—O	402	4.2

续表

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $\theta_{B.P.}$/℃	键	离解能 kJ·mol⁻¹	eV
Mn_2O_7	5.9	55(d)	Mn—O	402	4.2
MnF_2	856	—	Mn—F	502	5.2
$MnCl_2$	650	1190	Mn—Cl	335	3.5
Mo	2610	5560	Mo—Mo	≈406	≈4.2
MoO_2	795	1251	OMo—O	669	6.9
MoO_3	795	1155(s)	O_2Mo—O	561	5.8
MoC	2692	—	—	—	—
Mo_2C	2687	—	—	—	—
MoF_6	17.5	37	—	—	—
$MoCl_5$	194	268	—	—	—
Mo_2S_3	1100(d)	1200(v)	—	—	—
N_2	−209.86	−195.8	N—N	941.69	9.8
NO	−163.6	−151.8	N—O	628	6.5
NH_3	−77.7	−33.35	H_2N—H	431	4.5
NF_3	−260.60	−128.8	—	—	—
Na	97.81±0.03	882.9	Na—Na	71	0.75
Na_2O	1275(s)	—	Na—O	272	2.8
NaOH	318.4	1390	Na—OH	322	3.3
NaCN	563.7	1496	—	—	—
NaF	993	1695	Na—F	477	4.9
NaCl	801	1413	Na—Cl	410	4.2
NaBr	747	1390	—	—	—
NaI	661	1304	Na—I	297	3.1
Nb	2468±10	5127	Nb—Nb	≈511	≈5.3
Nb_2O_5	1485	1520	Nb—O	753	7.8
NbC	3500	4573	—	—	—
NbN	2573	—	—	—	—
NbF_5	72~73	236	—	—	—
$NbCl_5$	204.7	254	—	—	—
$NbBr_5$	265.2	361.6	—	—	—
Nd	1021	3074	Nd—Nd	<163	<1.7
Nd_2O_3	≈1900	—	Nd—O	690	7.2
NdF_3	1410	2300	Nd—F	545	5.6
$NdCl_3$	784	1600	—	—	—
$NdBr_3$	684	540	—	—	—
Ne	−248.67	−245.9	Ne—Ne	3.93	0.041
Ni	1455	2730	Ni—Ni	228.0	2.4
NiO	1984	—	Ni—O	406	4.2
NiF_2	1450	1740	Ni—F	368	3.8
$NiCl_2$	1001	973(s)	Ni—Cl	347	3.6
NiS	797	—	Ni—S	357	3.7
Np	630	—	—	—	—
O_2	−218.4	−182.962	O—O	494	
H_2O	0.000	100.000	HO—H	493.7	5.1
Os	≈2700	>5300	—	—	—
OsO_4	40.6	130	O_3Os—O	452	4.7
OsF_6	32.1	45.9	—	—	—
P(黄)	44.1	280	P—P	481	5.0
(红)	590(4.4MPa)	—			
P_2O_5	580~585	300(s)	P—O	592.0	6.1
PH_3	−133	−87.7	P—H	339	3.5
PF_5	−83	−75	P—F	435	4.5
PCl_5	166.8(d)	162(s)	P—Cl	289	3.0
PBr_3	−40	172.9	—	—	—
P_2S_5	286~290	514	P—S	502	5.2
Pa	<1600	4227	—	—	—
Pb	327.502	1740	Pb—Pb	75	0.8
PbO	886	1472	Pb—O	377	3.9
PbF_2	855	1290	Pb—F	289	3

续表

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $\theta_{B.P.}$/℃	键	离解能 kJ·mol⁻¹	离解能 eV
$PbCl_2$	501	950	Pb—Cl	297	3.1
$PbBr_2$	373	916	Pb—Br	243	2.5
PbI_2	402	954	Pb—I	192	2
PbS	1114	1281	Pb—S	318	3.3
Pd	1554	2970	Pd—Pd	<138	<1.4
PdO	870	550	Pd—O	280	2.9
$PdCl_2$	500(d)	—	—	—	—
PdI_2	350(d)	—	—	—	—
PdS	950(d)	—	—	—	—
Pm	1080	(2727)	—	—	—
Po	254	962	Po—Po	184	1.9
PoO_2	500(d)	—	—	—	—
PoS	275(d)	—	—	—	—
Pr	931	3520	—	—	—
PrO_2	>350	—	Pr—O	761	7.9
PrF_3	1370	2327	Pr—F	579	6.0
$PrCl_3$	823	1707	—	—	—
$PrBr_3$	691	1547	—	—	—
PrI_3	737	—	—	—	—
Pt	1772	3827±100	Pt—Pt	≈357	≈3.7
PtO	550(d)	750	Pt—O	347	3.6
PtF_6	57.6	—	—	—	—
$PtCl_3$	435	—	—	—	—
Pu	641	3232	—	—	—
PuF_6	50.75	62.3	Pu—F	540	5.6
$PuCl_3$	760	—	—	—	—
$PuBr_3$	681	—	—	—	—
Ra	700	<1140	—	—	—
$RaCl_2$	1000	—	Ra—Cl	339	3.5
$RaBr_2$	728	900(s)	—	—	—
Rb	38.89	686	Rb—Rb	46	0.47
Rb_2O_2	570	1011(d)	Rb—O	347	3.6
Rb_2O	400(d)	—	Rb—O	347	3.6
RbF	795	1410	Rb—F	490	5.1
RbCl	718	1390	Rb—Cl	444	4.6
RbBr	693	1340	Rb—Br	385	4.0
RbI	647	1300	Rb—I	331	3.4
Re	3180	5627	—	—	—
Re_2O_7	≈297	250(s)	—	—	—
ReF_4	124.5	500(d)	—	—	—
ReF_6	18.8	47.6	—	—	—
$ReCl_4$	—	500	—	—	—
ReC_3	—	>500	—	—	—
Rh	1966±3	3727±100	Rh—Rh	289	3.0
Rh_2O_3	1100~1150(d)	—	Rh—O	423	4.4
RhF_3	>600(s)	—	—	—	—
$RhCl_3$	450~500(d)	800(s)	—	—	—
Rn	−71	−62	—	—	—
Ru	2310	3900	—	—	—
RuO_4	25.5	108(d)	Ru—O	435	4.5
RuF_5	101	250	—	—	—
$RuCl_3$	>500(d)	—	—	—	—
$S(S_8)$	119.0	444.674	S—S	424.7	4.4
SO_2	−72.7	−10	OS—O	547.3	5.7
SO_3	16.83	44.8	O_2S—O	342.7	3.6
H_2S	−85.5	−60.7	HS—H	377	3.9
SCl_2	−78	59(d)	—	—	—
Sb	630.5	1750	Sb—Sb	295	3.1
Sb_2O_3	656	1550(s)	Sb—O	368	3.8

续表

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $\theta_{B.P.}$/℃	键	离解能 kJ·mol⁻¹	离解能 eV
SbF_3	292	319(s)	Sb—F	435	4.5
$SbCl_3$	73.4	283	Sb—Cl	356	3.7
$SbCl_5$	2.8	79	Sb—Cl	356	3.7
$SbBr_3$	96.6	280	Sb—Br	310	3.2
Sb_2S_3	550	≈1150	Sb—S	376	3.9
Sc	1541	2836	Sc—Sc	108.4	1.1
Sc_2O_3	>1000	4450	Sc—O	678	7.0
$ScCl_3$	939	800～850(s)	Sc—Cl	385	4.0
$ScBr_3$	>1000(s)	—	—	—	—
Se	217	684±1.0	Se—Se	305	3.2
SeO_2	340	315(s)	Se—O	418	4.3
SeO_3	118	180(d)	Se—O	418	4.3
H_2Se	−60.4	−41.5	Se—H	305	3.16
SeF_4	−13.8	>100	Se—F	338	3.5
$SeCl_4$	205(s)	288(d)	Se—Cl	318	3.3
Si	1410	2355	Si—Si	314	3.4
SiO_2	1723±5	2230	OSi—O	469	4.9
SiC	≈2700(s)	—	Si—C	427	4.4
Si_3N_4	1900(加压)	—	Si—N	435	4.5
SiF_4	−90.2	−86	Si—F	481	5.0
$SiCl_4$	−70	57.57	Si—Cl	381	3.9
$SiBr_4$	5.4	154	Si—Br	339	3.5
SiI_4	120.5	287.5	—	—	—
Sm	1074	1794	—	—	—
Sm_2O_3	2325	—	Sm—O	590	6.1
SmC_3	678±1	—	—	—	—
SmF_3	1306	2323	Sm—F	548	5.7
$SmCl_2$	740	1667(d)	Sm—Cl	425	4.4
$SmBr_2$	508	1880	—	—	—
SmI_2	527	1580	—	—	—
Sn	231.9681	2270	Sn—Sn	192	2.0
SnO_2	1630	1800～1900(s)	Sn—O	544	5.6
SnH_4	−150(d)	−52	Sn—H	259	2.7
SnF_2	292	619	Sn—F	376	3.9
SnF_4	705(s)	—	Sn—F	376	3.9
$SnCl_2$	246	652	Sn—Cl	310	3.2
$SnCl_4$	−33	114.1	Sn—Cl	310	3.2
$SnBr_4$	31	202	Sn—Br	192	2.0
$SnBr_2$	215.5	620	Sn—Br	192	2.0
SnI_2	320	717	—	—	—
SnI_4	144.5	364.5	—	—	—
SnS	882	1230	Sn—S	464	4.8
Sr	769	1384	Sr—Sr	≈15.5	≈0.16
SrO	2430	≈3000	Sr—O	460	4.8
SrF_2	1473	2489	Sr—F	540	5.6
$SrCl_2$	875	1250	ClSr—Cl	418	4.3
Ta	2996	5425±100	—	—	—
Ta_2O_5	2400	3200	Ta—O	812	8.4
TaC	3880	5500	—	—	—
TaN	3360±50	—	Ta—N	608	6.3
TaF_5	96.8	229.5	—	—	—
$TaCl_5$	216	242	—	—	—
$TaBr_5$	265	348.8	—	—	—
Tb	1356	3230	Tb—Tb	125	1.3
Tb_2O_3	2387	—	Tb—O	715	7.4
TbF_3	1172	2280	Tb—F	560	5.8
$TbCl_3 \cdot 6H_2O$	588(无水物)	180～200(HCl 中)	—	—	—
$TbBr_3$	827	1490	—	—	—
TbI_3	946	>1300	—	—	—

续表

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $θ_{B.P.}$/℃	键	离解能 kJ·mol⁻¹	eV
Tc	2250	4567	—	—	—
Tc_2O_7	1190	3100	—	—	—
Te	449.5±0.3	989.8±3.8	Te—Te	218	2.3
TeO_2	733	1245	Te—O	377	3.9
H_2Te	−48.9	−2.2	Te—H	268	2.78
TeF_4	−36	35.5	—	—	—
$TeCl_4$	224	380	—	—	—
$TeCl_2$	209±5	327	—	—	—
$TeBr_2$	210	339	—	—	—
Th	1750	4787	Th—Th	≤289	≤3.0
ThO_2	3220±50	4400	OTh—O	<770	<8.0
ThC_2	2655±25	≈5000	Th—C	482	5.0
ThF_4	>900	—	—	—	—
$ThCl_4$	770±2(s)	928(d)	—	—	—
$ThBr_4$	610(s)	725	—	—	—
ThI_4	566	839	—	—	—
Ti	1660±10	3287	Ti—Ti	<243	<2.5
TiO_2	1830～1850	2500～3000	OTi—O	519	5.4
TiC	3140±90	4820	Ti—C	<531	<5.8
TiN	2930	—	Ti—N	464	4.81
TiF_3	1200	1400	Ti—F	569	5.9
TiF_4	>400	284(s)	Ti—F	569	5.9
$TiCl_3$	440(d)	660	Ti—Cl	492	5.1
$TiCl_4$	−25	136.4	Ti—Cl	492	5.1
$TiBr_4$	39	230	—	—	—
TiI_4	150	377.1	—	—	—
Tl	303.5	1457±10	Tl—Tl	<88	<0.9
Tl_2O	300	1865	—	—	—
Tl_2O_3	759	875	—	—	—
TlF	327	655	Tl—F	439	4.6
TlCl	430	720	Tl—Cl	364	3.8
$TlBr_3$	462	819	Tl—Br	326	3.4
TlI_3	442	823	Tl—I	280	2.9
Tm	1545	1950	—	—	—
TmF_3	1158	2277	Tm—F	569	5.9
$TmCl_3·7H_2O$	824	1440	—	—	—
$TmBr_3$	952	1440	—	—	—
TmI_3	1015	1260	—	—	—
U	1132.3±0.8	3818	U—U	222	2.3
U_2O_3	1300(d)(生成 UO_2)	—	U—O	749	7.8
UO_2	2878±20	—	OU—O	674	7.0
UC_2	2350～2400	4370	U—C	463	4.8
UCl_4	590±1	792	—	—	—
UBr_4	516	792	—	—	—
UI_4	506	759	—	—	—
V	1890±10	3380	V—V	241	2.5
V_2O_3	1970	3900	V—O	617.6	6.4
V_2O_5	690	1750(d)	V—O	617.6	6.4
VC	2810	3900	V—C	473	4.9
VF_5	19.5	111.2	V—F	589	6.1
VCl_4	−28±2	148.5	V—Cl	473	4.9
W	3410±20	5660	—	—	—
WO_2	1500	1830	W—O	661	6.0
WO_3	1473	5929	O_2W—O	594	6.2
WC	2870±50	6000	—	—	—
WF_6	2.5	17.5	W—F	550	5.7
WCl_5	248	276	W—Cl	425	4.4
WCl_6	275	346.7	W—Cl	425	4.4
WBr_5	276	333	—	—	—

续表

元素及化合物	熔点 θ/℃	沸点 $\theta_{B.P.}$/℃	键	离解能	
				kJ·mol⁻¹	eV
Xe	−111.9	−107.1±3	Xe—Xe	≈6.53	≈0.068
Y	1522	3338	Y—Y	156.1	1.6
Y_2O_3	2410	4300	Y—O	707	7.3
YC_2	—	4873	Y—C	415	4.3
YF_3	1387	2260	Y—F	360	3.7
YCl_3	721	1507	Y—Cl	339	3.5
Yb	819	1196	Yb—Yb	19	0.2
Yb_2O_3	1477	3227	Yb—O	396	4.1
YbF_2	1052	2380	Yb—F	≥521	≥5.4
YbF_3	1157	2200	Yb—F	≥521	≥5.4
$YbCl_2$	702	1900	Yb—Cl	≈318	≈3.3
$YbBr_2$	677	1800	—	—	—
YbI_2	780±4	1300(d)	—	—	—
Zn	419.58	907	Zn—Zn	25	0.25
ZnO	1975	>1800(s)	Zn—O	272	2.8
ZnF_2	872	≈1500	Zn—F	367	3.8
$ZnCl_2$	283	732	Zn—Cl	205	2.1
$ZnBr_2$	394	650	—	—	—
ZnI_2	446	624(d)	Zn—I	134	1.4
ZnS	1700±20(5.1MPa)	1185	Zn—S	201	2.1
Zr	1852±2	4377	—	—	—
ZrO_2	2715	≈5000	OZr—O	628	6.5
ZrC	3540	5100	Zr—C	560	5.8
ZrN	2980±50	—	Zr—N	519	5.4
ZrF_4	≈600(s)	—	Zr—F	627	6.5
$ZrCl_4$	437(2.5MPa)	>331(s)	Zr—Cl	540	5.6
$ZrBr_2$	350(d)	—	—	—	—
$ZrBr_4$	450±1	357(s)	—	—	—
ZrI_4	499±2	≈600(d)	—	—	—

① 表中 d、s 和 v 分别为分解温度，升华温度和挥发温度。

三、辐射跃迁及谱线强度

（一）辐射跃迁

1917 年爱因斯坦以量子理论为基础提出了辐射理论，即任何一条光谱线都是原子从一个能级(E_j)跃迁到另一个能级(E_i)所产生。在一般情况下，两个能级之间存在着下述三种跃迁。

1. 自发发射

处于高能级 E_j 的原子会自发跃迁到低能级 E_i，并发出辐射 $h\nu_{ji}$。若每秒内有 N_j 个原子自发跃迁至 i 态，此时 dN_j 必然与 j 状态的原子数成正比，即

$$dN_j = A_{ji}N_j \tag{2-3}$$

A_{ji}称自发发射跃迁几率(s^{-1})，也称自发辐射爱因斯坦系数，指单位时间内每个原子由一个能级状态(E_j)跃迁至另一状态(E_i)的次数。

2. 受激发射

在外来光子 $h\nu_{ji}$的激励下，处于高能级 E_j 的原子向低能级 E_i 跃迁而发出光子 $h\nu_{ji}$，即为受激发射。在此过程中，每秒发生受激跃迁的原子数 dN_j 与处于高能级的原子数 N_j 及辐射能量密度 $\rho(\nu_{ji})$成正比。

$$dN_j = B_{ji}\rho(\nu_{ji})N_j \tag{2-4}$$

式中，$B_{ji}\rho(\nu_{ji})$是每秒受激跃迁几率；B_{ji}为受激辐射的爱因斯坦系数。

3. 吸收跃迁

处于低能级 E_i 的原子在外来光子 $h\nu_{ji}$ 的作用下，吸收光子 $h\nu_{ji}$ 的能量，从 E_i 跃迁至高能级 E_j，这一过程称吸收跃迁。在此过程中，每秒产生吸收跃迁的原子数 dN_i 与处于低能级的原子数 N_i 及辐射能量密度 $\rho(\nu_{ji})$ 成正比。

$$dN_i = B_{ij}\rho(\nu_{ji})N_i \tag{2-5}$$

式中，B_{ij} 为受激吸收跃迁的爱因斯坦系数。

在热力学平衡体系中，系统的总能量不变，即单位时间内产生吸收跃迁的原子数必须等于自发辐射和受激辐射跃迁的原子数，可表示为

$$A_{ji}N_j + B_{ji}N_j\rho(\nu_{ji}) = B_{ij}N_i\rho(\nu_{ji}) \tag{2-6}$$

（二）谱线强度

谱线强度是谱线的主要特性之一，是光谱定量分析的依据。辐射的谱线强度，与处在 j 态的原子数目，$j \to i$ 的跃迁几率以及辐射光子的能量（$h\nu_{ji}$）有关。

当体系处于热力学平衡状态时，原子在能级上的布居数，服从 Boltzman 分布。

$$\frac{N_j}{N_i} = \frac{g_j}{g_i}\exp[-(E_j - E_i)/kT] \tag{2-7}$$

式中　N_j、N_i——高、低能级的原子数；

g_j、g_i——j 能级、i 能级的统计权重；

E_j、E_i——j 能级、i 能级的激发能；

k——Boltzman 常数（1.381×10^{-23}J·K^{-1}）；

T——光源的激发温度。

当低能级为基态 N_0 时，$E_i = 0$，(2-7) 式可表示为

$$\frac{N_j}{N_0} = \frac{g_j}{g_0}\exp(-E_j/kT)$$

$$N_j = \frac{g_j}{g_0}N_0\exp(-E_j/kT) \tag{2-8}$$

对(2-8)式求和，可得处于所有各个能级的原子总数，

$$N = \sum_{m=0}^{j} N_m = \frac{N_0}{g_0}\sum_{m=0}^{j} g_m\exp(-E_m/kT) \tag{2-9}$$

令

$$G = \sum_{m=0}^{j} g_m\exp(-E_m/kT) \tag{2-10}$$

则

$$N = \frac{N_0}{g_0}G \tag{2-11}$$

$$N_j = \frac{g_j}{G}N\exp(-E_j/kT) \tag{2-12}$$

式中 G 为原子所处各能级的状态和，称为配分函数。各种元素的原子和离子的基态光谱项及在不同温度下的配分函数值见表 2-3。

按照爱因斯坦理论，谱线发射的净强度为

$$I_{ji} = A_{ji}h\nu_{ji}N_j + B_{ji}\rho(\nu)h\nu_{ji}N_j - B_{ij}\rho(\nu)h\nu_{ji}N_i \tag{2-13}$$

A_{ji}、B_{ji}、B_{ij} 之间存在如下关系：

$$g_iB_{ij} = g_jB_{ji} \tag{2-14}$$

$$A_{ji} = (8\pi h\nu^3/c^3)B_{ji} \tag{2-15}$$

表 2-3 原子和离子基态光谱项和配分函数

原子和离子	基态光谱项	配分函数				
		2000K	2500K	3000K	5000K	6000K
Ag	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01
Ag（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Al	${}^{2}P_{1/2}$	5.69	5.75	5.79	5.9	5.9
Al（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
As	${}^{4}S_{3/2}$	4.00	4.02	4.06	4.5	4.8
As（Ⅱ）	${}^{3}P_{0}$	3.21	3.80	4.32	5.9	6.5
Au	${}^{2}S_{1/2}$	2.01	2.03	2.07	2.43	2.68
Au（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.01	1.14	1.26
B	${}^{2}P_{1/2}$	5.95	5.96	5.97	6.00	6.00
B（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ba	${}^{1}S_{0}$	1.02	1.08	1.21	2.53	3.64
Ba（Ⅱ）	${}^{2}S_{1/2}$	2.22	2.47	2.78	4.2	4.8
Be	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.02	1.04
Be（Ⅱ）	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Bi	${}^{4}S_{3/2}$	4.00	4.01	4.02	4.2	4.4
Bi（Ⅱ）	${}^{3}P_{0}$	1.00	1.00	1.01	1.10	1.20
C	${}^{3}P_{0}$	8.81	8.86	8.89	9.2	9.4
C（Ⅱ）	${}^{2}P_{1/2}$	5.82	5.86	5.88	5.9	5.9
Ca	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.17	1.38
Ca（Ⅱ）	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.01	2.21	2.41
Cd	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cd（Ⅱ）	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Co	${}^{4}F_{9/2}$	19.30	21.95	24.45	33.5	38.0
Co（Ⅱ）	${}^{3}F_{4}$	16.09	18.54	20.93	29.6	33.4
Cr	${}^{7}S_{3}$	7.10	7.30	7.65	10.3	12.6
Cr（Ⅱ）	${}^{6}S_{5/2}$	6.00	6.03	6.08	7.1	8.3
Cs	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.01	2.03	2.5	3.1
Cs（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.01	2.03	2.32	2.60
Cu（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.02	1.07
Fe	${}^{5}D_{4}$	19.46	20.72	21.94	27.7	31.6
Fe（Ⅱ）	${}^{6}D_{9/2}$	28.17	31.46	34.30	42.5	47.6
Ga	${}^{2}P_{1/2}$	4.21	4.49	4.69	5.1	5.3
Ga（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ge	${}^{3}P_{0}$	4.85	5.48	6.00	7.5	8.1
Ge（Ⅱ）	${}^{2}P_{1/2}$	3.12	3.45	3.71	4.4	4.6
Hf	${}^{3}F_{2}$	6.77	7.81	8.94	13.8	16.6
Hf（Ⅱ）	${}^{4}F_{3/2}$	5.25	6.19	7.27	12.4	15.5
Hg	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Hg（Ⅱ）	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
In	${}^{2}P_{1/2}$	2.81	3.12	3.38	4.1	4.4
In（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ir	${}^{4}F_{9/2}$	11.75	12.95	14.31	20.9	—
Ir（Ⅱ）		—	—	—	14.0	—
K	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.01	2.18	2.44
K（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
La	${}^{2}D_{3/2}$	9.41	11.70	14.12	25.7	32.6
La（Ⅱ）	${}^{3}F_{2}$	14.78	17.70	20.34	29.4	33.8
Li	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.09	2.20
Li（Ⅱ）	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Mg	${}^{1}S_{0}$	1.00	1.00	1.00	1.02	1.04
Mg（Ⅱ）	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Mn	${}^{6}S_{5/2}$	6.00	6.00	6.00	6.4	6.9
Mn（Ⅱ）	${}^{7}S_{3}$	7.01	7.03	7.08	7.7	8.4
Mo	${}^{7}S_{3}$	7.01	7.04	7.12	8.8	11.2
Mo（Ⅱ）	${}^{6}S_{5/2}$	6.00	6.02	6.07	7.6	9.5
Na	${}^{2}S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.05	2.11

续表

原子和离子	基态光谱项	配分函数				
		2000K	2500K	3000K	5000K	6000K
Na (Ⅱ)	$^1S_0$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Nb	$^6D_{1/2}$	26.68	30.96	34.96	53.3	63.9
Nb (Ⅱ)	$^5D_0$	18.55	22.41	26.24	43.0	52.2
Ni	$^3F_4$	22.70	24.71	26.35	30.8	32.6
Ni (Ⅱ)	$^2D_{5/2}$	7.39	7.83	8.30	10.8	12.4
Os	$^5D_4$	10.41	11.50	12.78	19.7	24.3
Os (Ⅱ)	$^6D_{9/2}$	11.07	11.93	12.92	17.8	20.6
P	$^4S_{3/2}$	4.00	4.01	4.04	4.4	4.7
P (Ⅱ)	$^3P_0$	7.23	7.57	7.83	8.6	9.0
Pb	$^3P_0$	1.01	1.04	1.10	1.55	1.90
Pb (Ⅱ)	$^2P_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.08	2.14
Pd	$^1S_0$	1.08	1.23	1.46	2.92	3.84
Pd (Ⅱ)	$^2D_{5/2}$	6.31	6.52	6.73	7.4	7.8
Pt	$^3D_3$	14.90	15.98	16.86	19.8	21.1
Pt (Ⅱ)	$^2D_{5/2}$	6.34	6.71	7.18	9.7	11.2
Rb	$^2S_{1/2}$	2.00	2.00	2.01	2.2	2.62
Rb (Ⅱ)	$^1S_0$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Re	$^6S_{5/2}$	6.00	6.02	6.07	7.5	9.3
Re (Ⅱ)	$^7S_0$	7.00	7.01	7.02	7.6	8.5
Rh	$^4F_{9/2}$	14.71	16.68	18.65	26.5	30.4
Rh (Ⅱ)	$^3F_4$	10.64	11.46	12.26	15.4	17.1
Ru	$^5F_5$	17.64	19.92	22.31	33.9	41.1
Ru (Ⅱ)	$^4F_{9/2}$	14.16	15.65	17.12	23.7	27.6
Sb	$^4S_{3/2}$	4.01	4.05	4.12	4.7	5.2
Sb (Ⅱ)	$^3P_0$	1.42	1.71	2.04	3.3	4.0
Sc	$^2D_{3/2}$	9.32	9.46	9.65	11.9	14.0
Sc (Ⅱ)	$^3D_1$	15.35	16.56	17.81	22.7	25.1
Se	$^3P_2$	5.88	6.21	6.50	7.5	7.9
Se (Ⅱ)	$^4S_{3/2}$	4.00	4.00	4.02	4.2	4.4
Si	$^3P_0$	8.15	8.40	8.63	9.5	9.8
Si (Ⅱ)	$^2P_{1/2}$	5.25	5.39	5.49	5.7	5.7
Sn	$^3P_0$	2.32	2.86	3.38	5.15	5.8
Sn (Ⅱ)	$^2P_{1/2}$	2.19	2.35	2.52	3.2	3.4
Sr	$^1S_0$	1.00	1.00	1.01	1.23	1.56
Sr (Ⅱ)	$^2S_{1/2}$	2.00	2.00	2.01	2.16	2.32
Ta	$^4F_{3/2}$	6.16	7.43	8.88	17.0	22.5
Ta (Ⅱ)	$^4F_1$	7.71	9.78	12.02	22.3	28.2
Te	$^3P_2$	5.13	5.27	5.44	6.3	6.7
Te (Ⅱ)	$^4S_{3/2}$	4.00	4.02	4.05	4.4	4.7
Th	$^3F_2$	—	—	—	19.0	—
Th (Ⅱ)	$^4F_{3/2}$	—	—	—	34.5	—
Ti	$^3F_2$	18.35	19.49	20.82	29.4	36.0
Ti (Ⅱ)	$^4F_{3/2}$	27.34	40.91	44.02	55.4	61.2
Tl	$^2P_{1/2}$	2.01	2.05	2.10	2.42	2.62
Tl (Ⅱ)	$^1S_0$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
U	$^5L_6$	—	—	—	54	—
U (Ⅱ)	$^4I_{9/2}$	—	—	—	80	—
V	$^4F_{3/2}$	28.32	31.71	34.71	47.6	55.9
V (Ⅱ)	$^5D_0$	25.98	28.97	31.81	43.2	49.9
W	$^5D_0$	3.52	4.87	6.28	12.7	16.5
W (Ⅱ)	$^6D_{1/2}$	4.39	5.61	6.96	13.8	13.1
Y	$^2D_{3/2}$	8.11	8.48	8.81	11.7	14.3
Y (Ⅱ)	$^1S_0$	7.98	9.55	10.94	15.8	18.1
Zn	$^1S_0$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Zn (Ⅱ)	$^2S_{1/2}$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Zr	$^3F_2$	14.64	17.20	19.91	33.9	43.0
Zr (Ⅱ)	$^4F_{3/2}$	20.85	25.01	29.14	45.0	52.9

从(2-14)式可以看出，当 $g_j=g_i$ 时，$B_{ji}=B_{ij}$，即在统计权重相同的两个能级中，一个外来光子引起的受激发射几率与吸收跃迁几率是相等的。另外从 Boltzman 公式可以看出，在热力学平衡状态时，处于高能级 E_j 的布居数 N_j 远小于低能级 E_i 的布居数 N_i，因此在一般情况下，$B_{ji}\rho(\nu)$ 远小于 A_{ji}，受激发射可以忽略，此时

$$I_{ji}=A_{ji}h\nu_{ji}N_j-B_{ij}\rho(\nu)h\nu_{ji}N_i \qquad (2\text{-}16)$$

(2-16)式的第二项决定光谱自吸收程度，当无自吸收时，

$$I_{ji}=A_{ji}h\nu_{ji}N_j \qquad (2\text{-}17)$$

将(2-12)式代入(2-17)式，可得原子谱线的强度，

$$I_{ji}=A_{ji}h\nu_{ji}\frac{g_j}{G}N\exp(-E_j/kT) \qquad (2\text{-}18)$$

式中，N 为处于各种状态的原子总数；G 为原子的配分函数。

对于火花及 ICP 光源，常采用离子线，离子谱线的强度为

$$I_{ji}^{+}=A_{ji}^{+}h\nu_{ji}^{+}\frac{g_j^{+}}{G^{+}}N^{+}\exp(-E_j^{+}/kT) \qquad (2\text{-}19)$$

式中，带“+”号的物理量为离子的相应物理量。

在发射光谱分析中，通常将(2-18)或(2-19)式简写为

$$I=\alpha\beta c \qquad (2\text{-}20)$$

式中，c 为试样中某元素的含量；$\alpha=\frac{N}{c}$ 或 $\frac{N^{+}}{c}$，称为蒸发系数；$\beta=A_{ji}h\nu_{ji}(g_j/G)\exp(-E_j/kT)$ 或 $A_{ji}^{+}h\nu_{ji}^{+}(g_j^{+}/G^{+})\exp(-E_j^{+}/kT)$，称为激发系数。表 2-4 为各种原子的跃迁几率及统计权重。

表 2-4 原子的跃迁几率及统计权重[2]

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$	元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ag	206.12	I	2	4	0.031	Al	104.79	Ⅱ	1	3	0.36
	206.99	I	2	2	0.015		104.86	Ⅱ	3	5	0.48
	328.07	I	2	4	1.4		153.98	Ⅱ	3	5	8.8
	338.29	I	2	2	1.3		167.08	Ⅱ	1	3	14.6
	520.91	I	2	4	0.75		171.94	Ⅱ	1	3	6.79
	546.55	I	4	6	0.86		176.40	Ⅱ	5	5	9.8
	547.16	I	4	4	0.14		177.28	Ⅱ	1	3	9.5
Al	226.35	I	2	4	0.66		177.70	Ⅱ	5	7	17
	226.91	I	4	6	0.79		181.90	Ⅱ	15	15	5.6
	226.92	I	4	4	0.13		185.59	Ⅱ	1	3	0.832
	236.71	I	2	4	0.72		185.80	Ⅱ	3	3	2.48
	237.31	I	4	6	0.86		186.23	Ⅱ	5	3	4.12
	237.34	I	4	4	0.14		193.10	Ⅱ	3	1	10.8
	256.80	I	2	4	0.23		199.05	Ⅱ	3	5	14.7
	257.51	I	4	6	0.28		281.62	Ⅱ	3	1	3.83
	257.54	I	4	4	0.044		466.31	Ⅱ	5	3	0.53
	265.25	I	2	2	0.133		622.62	Ⅱ	1	3	0.62
	266.04	I	4	2	0.264		623.18	Ⅱ	3	5	0.84
	308.22	I	2	4	0.63		624.34	Ⅱ	5	7	1.1
	309.27	I	4	6	0.74		633.57	Ⅱ	5	3	0.14
	309.28	I	4	4	0.12		682.34	Ⅱ	3	3	0.34
	394.40	I	2	2	0.493		683.71	Ⅱ	5	3	0.57
	396.15	I	4	2	0.98		692.03	Ⅱ	3	1	0.96
	669.60	I	2	4	0.0169		704.21	Ⅱ	3	5	0.59
	669.87	I	2	2	0.0169		705.67	Ⅱ	3	3	0.58
	783.53	I	4	6	0.057		747.14	Ⅱ	5	7	0.94
	783.61	I	6	8	0.062		135.28	Ⅱ	10	14	4.40

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Al	137.97	Ⅱ	2	2	4.59
	138.41	Ⅱ	4	2	9.1
	160.58	Ⅱ	2	4	12.2
	161.18	Ⅱ	4	4	2.42
	161.19	Ⅱ	4	6	14.5
	185.47	Ⅱ	2	4	5.40
	186.28	Ⅱ	2	2	5.33
	193.59	Ⅱ	10	14	12.2
	360.16	Ⅱ	6	4	1.34
	360.19	Ⅱ	4	4	0.149
	361.24	Ⅱ	4	2	1.5
Ar	340.618	I	3	1	0.0039
	364.983	I	3	1	0.0080
	394.898	I	5	3	0.00455
	415.859	I	5	5	0.0140
	419.103	I	1	3	0.00539
	419.832	I	3	1	0.0257
	420.067	I	5	7	0.00967
	425.936	I	3	1	0.0398
	427.217	I	3	3	0.00797
	433.356	I	3	5	0.00568
	451.073	I	3	1	0.0118
	458.721	I	3	1	0.0049
	474.682	I	3	1	0.0036
	476.868	I	3	5	0.0086
	487.626	I	3	5	0.0078
	488.795	I	3	3	0.013
	489.469	I	3	1	0.018
	504.881	I	3	5	0.0046
	505.653	I	3	1	0.0057
	506.008	I	7	9	0.0037
	515.139	I	3	1	0.0239
	516.229	I	3	3	0.0190
	519.402	I	3	1	0.0078
	522.127	I	7	9	0.0088
	525.279	I	5	7	0.0054
	542.135	I	7	5	0.0060
	545.165	I	3	5	0.0047
	549.209	I	3	1	0.0056
	549.587	I	7	9	0.0169
	550.611	I	5	7	0.0036
	555.870	I	3	5	0.0142
	557.254	I	5	7	0.0066
	559.748	I	5	7	0.0042
	560.673	I	3	3	0.0220
	562.092	I	3	1	0.0036
	565.070	I	3	1	0.0320
	570.087	I	5	7	0.0059
	580.208	I	5	3	0.0042
	588.262	I	3	1	0.0123
	588.858	I	7	5	0.0129
	592.881	I	5	3	0.011
	597.160	I	3	1	0.011
	602.515	I	5	3	0.0090
	609.881	I	3	3	0.0052
	610.564	I	3	5	0.0121
	614.544	I	5	7	0.0076
	617.310	I	3	5	0.0067
	621.594	I	5	5	0.0057

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ar	629.687	I	3	5	0.0090
	641.631	I	3	5	0.0116
	660.402	I	7	5	0.0028
	666.068	I	3	1	0.0078
	675.284	I	3	5	0.0193
	682.725	I	5	3	0.0024
	693.767	I	3	1	0.0308
	696.543	I	5	3	0.0639
	703.025	I	7	5	0.0267
	706.722	I	5	5	0.0380
	706.873	I	5	3	0.020
	715.883	I	3	1	0.021
	720.698	I	5	3	0.0248
	727.293	I	3	3	0.0183
	731.172	I	3	3	0.017
	737.212	I	7	9	0.019
	738.398	I	3	5	0.0847
	750.384	I	3	1	0.445
	751.465	I	3	1	0.402
	763.511	I	5	5	0.245
	772.376	I	5	3	0.0518
	772.421	I	1	3	0.117
	789.108	I	5	5	0.0095
	794.818	I	1	3	0.186
	801.479	I	5	5	0.0928
	811.531	I	5	7	0.331
	852.144	I	3	3	0.139
	912.297	I	5	3	0.189
	965.778	I	3	3	0.0543
	300.04	Ⅱ	4	4	1.5
	302.89	Ⅱ	2	4	2.3
	309.34	Ⅱ	4	6	4.4
	313.90	Ⅱ	6	6	1.0
	316.14	Ⅱ	2	4	1.8
	324.37	Ⅱ	4	2	2.0
	324.98	Ⅱ	2	4	1.0
	329.36	Ⅱ	4	4	1.7
	330.72	Ⅱ	2	2	3.4
	335.09	Ⅱ	6	6	1.5
	337.64	Ⅱ	8	8	1.5
	338.85	Ⅱ	2	4	1.9
	347.67	Ⅱ	6	6	1.34
	349.12	Ⅱ	4	4	2.2
	350.98	Ⅱ	2	2	2.5
	351.44	Ⅱ	4	6	1.23
	354.56	Ⅱ	4	6	3.4
	354.58	Ⅱ	6	8	3.9
	354.85	Ⅱ	4	4	1.1
	355.95	Ⅱ	6	8	3.9
	356.50	Ⅱ	2	4	1.1
	357.66	Ⅱ	6	8	2.77
	358.16	Ⅱ	2	4	1.8
	358.24	Ⅱ	4	6	3.72
	358.84	Ⅱ	8	10	3.39
	360.02	Ⅱ	4	4	2.2
	363.98	Ⅱ	4	6	1.4
	368.01	Ⅱ	2	4	1.2
	371.82	Ⅱ	4	6	2.0
	373.79	Ⅱ	6	8	2.3

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ar	380.32	Ⅱ	6	6	1.5
	386.85	Ⅱ	4	6	1.9
	392.57	Ⅱ	6	4	1.4
	393.25	Ⅱ	4	4	1.1
	394.61	Ⅱ	8	6	1.4
	397.94	Ⅱ	4	2	1.3
	404.29	Ⅱ	4	4	1.4
	413.17	Ⅱ	4	2	1.4
	422.26	Ⅱ	4	2	0.69
	427.75	Ⅱ	6	4	1.0
	434.81	Ⅱ	6	8	1.24
	437.97	Ⅱ	2	2	1.04
	444.89	Ⅱ	6	6	0.65
	458.99	Ⅱ	4	6	0.82
	460.96	Ⅱ	6	8	0.91
	463.72	Ⅱ	6	6	0.090
	480.60	Ⅱ	6	6	0.79
	484.78	Ⅱ	4	2	0.85
	487.99	Ⅱ	4	6	0.78
	500.93	Ⅱ	4	6	0.147
	501.72	Ⅱ	4	6	0.231
	663.82	Ⅱ	6	4	0.129
	664.37	Ⅱ	10	8	0.167
	668.43	Ⅱ	8	6	0.113
	302.41	Ⅲ	5	7	2.6
	305.48	Ⅲ	3	5	1.9
	306.48	Ⅲ	3	3	1.0
	307.82	Ⅲ	1	3	1.4
	328.59	Ⅲ	5	7	2.0
	330.19	Ⅲ	5	5	2.0
	331.13	Ⅲ	5	3	2.0
	333.61	Ⅲ	7	9	2.0
	334.47	Ⅲ	5	7	1.8
	335.85	Ⅲ	3	5	1.6
	348.06	Ⅲ	7	7	1.6
	349.97	Ⅲ	3	3	1.3
	350.36	Ⅲ	5	5	1.2
As	189.04	I	4	6	2.0
	193.76	I	4	4	2.0
	197.26	I	4	2	2.0
	228.81	I	6	4	2.8
	234.40	I	2	4	0.35
	234.98	I	4	2	3.1
	236.97	I	4	4	0.60
	237.08	I	4	6	0.42
	245.65	I	6	4	0.072
	249.29	I	4	2	0.12
	274.50	I	2	4	0.26
	278.02	I	4	4	0.78
	286.04	I	2	2	0.55
	289.87	I	4	2	0.099
Au	242.795	I	2	4	1.99
	267.595	I	2	2	1.64
	312.278	I	6	4	0.190
	627.830	I	4	2	0.034
B	137.86	I	2	4	3.50
	137.89	I	2	2	14.0
	137.89	I	4	4	17.5
	137.92	I	4	2	7.0
	146.55	I	2	4	3.34
	146.57	I	4	4	6.7
	146.58	I	6	4	10.0
	182.59	I	2	4	2.0
	182.64	I	4	6	2.4
	208.89	I	2	4	0.28
	208.96	I	4	6	0.33
	249.68	I	2	2	0.85
	249.77	I	4	2	1.69
Ba	240.92	I	1	3	0.00086
	241.41	I	1	3	0.0015
	242.01	I	1	3	0.0023
	242.74	I	1	3	0.0056
	243.25	I	1	3	0.0072
	243.88	I	1	3	0.0014
	244.46	I	1	3	0.0045
	245.24	I	1	3	0.00081
	247.32	I	1	3	0.0046
	250.02	I	1	3	0.015
	254.32	I	1	3	0.041
	259.66	I	1	3	0.12
	264.65	I	1	3	0.011
	270.26	I	1	3	0.025
	273.92	I	1	3	0.0091
	278.53	I	1	3	0.028
	307.16	I	1	3	0.41
	350.11	I	1	3	0.19
	388.93	I	1	3	0.0088
	390.99	I	3	5	0.49
	393.57	I	5	7	0.47
	393.79	I	5	5	0.11
	399.34	I	7	9	0.55
	399.57	I	7	7	0.088
	413.24	I	1	3	0.0071
	423.96	I	5	3	0.24
	424.26	I	3	5	0.056
	426.44	I	1	3	0.15
	428.31	I	5	7	0.64
	432.30	I	3	5	0.15
	432.52	I	5	7	0.071
	433.29	I	3	3	0.15
	435.03	I	3	5	0.60
	440.25	I	3	5	0.27
	440.68	I	5	5	0.10
	443.19	I	1	3	1.2
	446.71	I	5	7	0.056
	448.90	I	5	7	0.42
	449.36	I	5	5	0.36
	450.59	I	3	3	1.1
	452.32	I	5	5	0.96
	457.39	I	3	1	1.21
	457.96	I	5	5	0.70
	459.18	I	5	5	0.016
	459.97	I	3	1	0.407
	460.50	I	3	1	0.077
	461.99	I	1	3	0.093
	462.83	I	5	3	0.060
	467.36	I	7	5	0.065
	469.16	I	5	3	1.6

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$	元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ba	470.04	I	3	3	0.24	Ba	178.69	II	6	4	0.044
	472.64	I	5	3	0.46		189.27	II	2	4	0.090
	551.91	I	3	5	0.50		190.42	II	4	6	0.011
	553.55	I	1	3	1.19		190.68	II	2	2	0.051
	577.76	I	5	7	0.65		192.47	II	6	8	0.031
	578.40	I	3	5	0.21		195.42	II	4	6	0.13
	580.02	I	5	5	0.099		195.51	II	4	4	0.018
	580.57	I	7	7	0.011		197.02	II	4	2	0.067
	582.63	I	5	3	0.56		198.56	II	2	4	0.25
	590.76	I	3	5	0.015		199.95	II	2	4	0.10
	597.17	I	5	5	0.18		200.92	II	2	2	0.086
	599.71	I	3	3	0.27		205.27	II	4	6	0.20
	601.95	I	3	1	1.4		205.46	II	4	4	0.029
	606.31	I	5	3	0.57		208.00	II	4	2	0.10
	608.34	I	3	1	0.11		215.39	II	2	4	0.53
	611.08	I	7	5	0.55		220.09	II	2	2	0.20
	612.92	I	3	1	0.060		223.28	II	4	6	0.29
	634.17	I	5	7	0.19		223.54	II	4	4	0.044
	645.09	I	3	5	0.11		228.60	II	4	2	0.13
	648.29	I	5	7	0.44		252.85	II	2	4	0.71
	649.88	I	7	7	0.86		263.48	II	4	6	0.76
	652.73	I	5	5	0.59		264.14	II	4	4	0.12
	659.53	I	3	3	0.39		264.73	II	2	2	0.20
	667.53	I	5	3	0.19		277.14	II	4	2	0.40
	669.38	I	7	5	0.28		381.67	II	4	6	0.0023
	686.57	I	5	5	0.023		384.28	II	6	8	0.0022
	705.99	I	7	9	0.71		389.18	II	2	4	1.67
	712.03	I	3	5	0.21		402.41	II	6	4	0.0053
	719.52	I	1	3	0.24		405.75	II	8	6	0.012
	728.03	I	5	7	0.53		413.07	II	4	6	1.80
	739.24	I	3	3	0.50		416.60	II	4	4	0.37
	741.75	I	7	5	0.025		421.60	II	2	4	0.058
	748.81	I	7	7	0.10		428.78	II	2	2	0.024
	752.82	I	5	5	0.027		432.57	II	4	6	0.059
	767.21	I	3	5	0.31		432.96	II	4	4	0.0088
	778.05	I	5	5	0.13		440.52	II	4	2	0.039
	790.58	I	5	3	0.63		447.07	II	6	4	0.014
	791.13	I	1	3	0.00298		450.96	II	8	6	0.012
	814.77	I	5	5	0.063		452.49	II	2	2	0.72
	964.56	I	7	5	0.11		455.40	II	2	4	1.17
	970.43	I	3	1	0.16		470.89	II	2	4	0.097
	982.15	I	3	1	0.055		484.35	II	4	6	0.093
	1037.03	I	3	5	0.013		484.71	II	2	2	0.041
	1064.91	I	5	5	0.027		485.08	II	4	4	0.014
	141.34	II	6	8	0.017		490.00	II	4	2	0.775
	141.71	II	4	6	0.038		493.41	II	2	2	0.955
	144.49	II	4	6	0.081		499.78	II	4	2	0.061
	146.15	II	6	8	0.087		518.50	II	2	4	0.018
	148.70	II	4	6	0.14		536.14	II	4	6	0.048
	150.39	II	6	8	0.15		539.16	II	6	8	0.052
	155.44	II	4	6	0.26		541.36	II	6	6	0.00084
	157.27	II	6	8	0.24		542.11	II	6	6	0.0019
	157.39	II	6	6	0.016		542.88	II	6	4	0.023
	163.04	II	2	2	0.017		548.03	II	8	6	0.018
	167.45	II	4	6	0.22		578.42	II	2	4	0.20
	169.44	II	6	8	0.21		585.37	II	4	4	0.048
	169.72	II	6	6	0.017		598.13	II	4	6	0.16
	176.18	II	4	4	0.0039		599.99	II	4	4	0.026
	177.10	II	4	2	0.034		613.58	II	2	2	0.085

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ba	614.17	II	6	4	0.37
	636.32	II	6	4	0.0029
	637.29	II	4	4	0.00067
	637.89	II	4	2	0.099
	645.77	II	6	4	0.0030
	649.69	II	4	2	0.332
	755.68	II	6	4	0.0016
	767.82	II	8	6	0.00066
	871.07	II	6	8	0.80
	873.77	II	4	6	0.93
Be	149.18	I	1	3	0.013
	166.15	I	1	3	0.20
	234.86	I	1	3	5.56
	249.47	I	9	15	1.6
	265.06	I	9	9	4.31
	457.27	I	3	5	0.79
	119.71	II	2	2	0.47
	119.72	II	4	2	0.94
	151.23	II	2	4	9.2
	151.24	II	4	6	11
	177.61	II	2	2	1.4
	177.63	II	4	2	2.9
	245.38	II	2	6	0.142
	304.65	II	2	4	0.48
	304.67	II	4	6	0.59
	313.04	II	2	4	1.14
	313.11	II	2	2	1.15
	324.16	II	2	2	0.141
	324.18	II	4	2	0.28
	327.46	II	2	4	0.19
	327.47	II	2	2	0.19
	436.07	II	2	4	0.92
	436.10	II	4	6	1.1
	525.59	II	2	6	0.0256
	527.03	II	2	2	0.330
	527.08	II	4	2	0.66
	627.94	II	2	4	0.12
	627.97	II	4	6	0.143
	675.67	II	2	2	0.051
	675.71	II	4	2	0.102
	740.12	II	2	4	0.030
	740.14	II	2	2	0.030
Bi	195.45	I	4	6	1.2
	202.12	I	4	4	0.060
	206.17	I	4	6	0.99
	211.03	I	4	2	0.91
	217.73	I	4	2	0.026
	222.83	I	4	4	0.89
	223.06	I	4	6	2.6
	227.66	I	4	4	0.25
	251.57	I	4	6	0.043
	262.79	I	4	4	0.47
	269.68	I	4	6	0.064
	278.05	I	4	2	0.309
	279.87	I	6	6	0.036
	289.80	I	4	2	1.53
	293.83	I	6	4	1.23
	298.90	I	4	4	0.55
	299.33	I	4	6	0.16
Bi	302.46	I	6	6	0.88
	306.77	I	4	2	2.07
	307.67	I	4	4	0.035
	339.72	I	6	4	0.181
	340.29	I	6	6	0.016
	351.09	I	6	4	0.068
	359.61	I	2	4	0.198
	388.82	I	2	2	0.069
	412.15	I	2	2	0.164
	430.85	I	2	4	0.016
	449.30	I	2	4	0.015
	472.25	I	4	2	0.117
	613.48	I	4	4	0.018
Br	148.85	I	4	4	1.2
	154.07	I	4	4	1.4
	157.48	I	2	4	0.20
	157.64	I	4	6	0.021
	163.34	I	2	4	0.081
	436.51	I	2	4	0.0075
	442.51	I	4	2	0.0042
	444.17	I	6	4	0.0075
	447.26	I	4	4	0.0093
	447.77	I	6	8	0.013
	451.34	I	6	4	0.0028
	452.56	I	6	6	0.0072
	457.57	I	4	4	0.016
	461.46	I	4	6	0.0054
	497.98	I	4	4	0.0026
	524.51	I	2	4	0.0031
	534.54	I	2	4	0.0076
	734.85	I	4	6	0.12
	751.30	I	6	4	0.12
	780.30	I	2	4	0.053
	793.87	I	6	6	0.19
	813.15	I	2	4	0.038
	834.37	I	2	2	0.22
	844.66	I	4	4	0.12
	863.87	I	6	4	0.097
	470.49	II	5	7	1.1
	478.55	II	5	5	0.94
	481.67	II	5	3	1.1
C	126.09	I	3	1	1.2
	126.10	I	3	3	0.31
	126.11	I	3	5	0.30
	126.14	I	5	3	0.50
	126.16	I	5	5	0.93
	127.72	I	1	3	0.88
	127.73	I	3	5	1.2
	127.76	I	5	7	1.5
	127.92	I	5	7	0.11
	127.99	I	3	5	0.21
	128.01	I	1	3	0.27
	128.03	I	5	5	0.62
	128.04	I	3	3	0.20
	128.06	I	3	1	0.81
	128.08	I	5	3	0.35
	132.88	I	1	3	0.49
	143.16	I	5	7	1.5
	143.21	I	5	5	1.4

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$	元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
C	143.25	I	5	3	1.3	Ca	227.55	I	1	3	0.301
	145.90	I	5	3	0.37		299.50	I	1	3	0.367
	146.33	I	5	7	2.1		299.73	I	3	5	0.241
	146.74	I	5	3	0.46		299.96	I	3	3	0.279
	148.18	I	5	5	0.33		300.09	I	3	1	1.58
	156.03	I	1	3	0.82		300.69	I	5	5	0.75
	156.13	I	5	5	0.36		300.92	I	5	3	0.430
	156.14	I	5	7	1.4		334.45	I	1	3	0.151
	165.63	I	3	5	0.80		335.02	I	3	5	0.178
	165.69	I	1	3	1.1		336.19	I	5	7	0.223
	165.70	I	5	5	2.4		362.41	I	1	3	0.212
	165.74	I	3	3	0.80		363.08	I	3	5	0.297
	165.79	I	3	1	3.2		363.10	I	3	3	0.153
	165.81	I	5	3	1.3		364.44	I	5	7	0.355
	175.18	I	1	3	0.57		364.48	I	5	5	0.094
	176.39	I	1	3	0.022		387.05	I	3	5	0.072
	193.09	I	5	3	3.7		395.71	I	3	3	0.098
	247.86	I	1	3	0.18		397.37	I	5	3	0.175
	290.33	I	3	3	0.017		409.26	I	3	5	0.11
	290.50	I	5	3	0.022		409.49	I	5	7	0.12
	477.00	I	3	1	0.015		409.85	I	7	9	0.13
	477.18	I	5	5	0.012		410.85	I	5	7	0.90
	477.59	I	5	3	0.0062		422.67	I	1	3	2.18
	482.68	I	5	3	0.0047		428.30	I	3	5	0.434
	493.21	I	3	1	0.046		428.94	I	1	3	0.60
	505.22	I	3	5	0.017		429.90	I	3	3	0.466
	538.03	I	3	3	0.016		430.25	I	5	5	1.36
	579.31	I	7	5	0.0033		430.77	I	3	1	1.99
	580.06	I	5	3	0.0029		431.87	I	5	3	0.74
	580.52	I	3	1	0.0039		435.51	I	5	7	0.19
	658.76	I	3	3	0.024		442.54	I	1	3	0.498
	100.99	II	2	4	5.8		443.50	I	3	5	0.67
	101.01	II	4	4	11.5		443.57	I	3	3	0.342
	101.04	II	6	4	17.3		445.48	I	5	7	0.87
	103.63	II	2	2	8.0		445.59	I	5	5	0.20
	103.70	II	4	2	15.9		452.69	I	5	3	0.41
	132.39	II	4	4	4.53		457.86	I	3	5	0.176
	132.40	II	6	6	4.71		458.14	I	5	7	0.209
	133.45	II	2	4	2.41		458.59	I	7	9	0.229
	133.57	II	4	6	2.89		468.53	I	3	5	0.080
	250.91	II	2	4	0.54		487.81	I	5	7	0.188
	251.17	II	4	4	0.106		504.16	I	5	3	0.33
	251.21	II	4	6	0.64		518.89	I	3	5	0.40
	657.81	II	2	4	0.36		526.17	I	3	3	0.15
	658.29	II	2	2	0.36		526.22	I	3	1	0.60
	723.13	II	2	4	0.36		526.42	I	5	5	0.091
	723.64	II	4	6	0.44		526.56	I	5	3	0.44
	723.72	II	4	4	0.072		527.03	I	7	5	0.50
	117.49	III	3	5	3.42		558.20	I	5	7	0.060
	117.53	III	1	3	4.55		558.88	I	7	7	0.49
	117.56	III	3	3	3.41		559.01	I	3	5	0.083
	117.57	III	5	5	10.2		559.45	I	5	5	0.38
	117.60	III	3	1	13.6		559.85	I	3	3	0.43
	117.64	III	5	3	5.7		560.13	I	7	5	0.086
	124.74	III	3	1	18.6		560.29	I	5	3	0.14
	229.69	III	3	5	1.46		585.75	I	3	5	0.66
	464.74	III	3	5	0.73		610.27	I	1	3	0.096
	465.03	III	3	3	0.74		612.22	I	3	3	0.287
	465.15	III	3	1	0.74		616.13	I	5	5	0.033

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ca	616.22	I	5	3	0.477
	616.38	I	3	3	0.056
	616.64	I	3	1	0.22
	616.91	I	5	3	0.17
	616.96	I	7	5	0.19
	643.91	I	7	9	0.53
	644.98	I	3	5	0.090
	646.26	I	5	7	0.47
	647.17	I	7	7	0.059
	649.38	I	3	5	0.44
	649.97	I	5	5	0.081
	134.19	II	2	4	0.015
	134.25	II	2	2	0.015
	164.99	II	2	4	0.0032
	165.20	II	2	2	0.0031
	167.39	II	2	4	0.224
	168.01	II	4	6	0.265
	180.73	II	2	4	0.354
	181.45	II	4	6	0.42
	181.47	II	4	4	0.070
	184.31	II	2	2	0.16
	185.07	II	4	2	0.308
	210.32	II	2	4	0.82
	211.28	II	4	6	0.97
	211.32	II	4	4	0.16
	219.78	II	2	2	0.31
	220.86	II	4	2	0.62
	315.89	II	2	4	3.1
	317.93	II	4	6	3.6
	318.13	II	4	4	0.58
	370.60	II	2	2	0.88
	373.69	II	4	2	1.7
	393.37	II	2	4	1.47
	396.85	II	2	2	1.4
Cd	228.80	I	1	3	5.3
	283.69	I	1	3	0.28
	288.08	I	3	5	0.42
	288.12	I	3	3	0.24
	298.06	I	5	7	0.59
	298.14	I	5	5	0.15
	326.11	I	1	3	0.00406
	340.37	I	1	3	0.77
	346.62	I	3	5	1.2
	346.77	I	3	3	0.67
	361.05	I	5	7	1.3
	361.29	I	5	5	0.35
	414.05	I	3	5	0.047
	466.24	I	3	5	0.055
	467.81	I	1	3	0.13
	479.99	I	3	3	0.41
	508.58	I	5	3	0.56
	643.85	I	3	5	0.59
	214.44	II	2	4	2.8
	226.50	II	2	2	3.0
	257.29	II	2	2	1.7
	274.85	II	4	2	2.8
	441.56	II	4	6	0.014
Cl	118.88	I	4	6	2.33
	120.14	I	2	4	2.39
Cl	133.57	I	4	2	1.74
	134.72	I	4	4	4.19
	135.17	I	2	2	3.23
	136.34	I	2	4	0.75
	432.33	I	4	4	0.011
	436.33	I	4	6	0.0068
	437.99	I	4	4	0.014
	438.98	I	6	8	0.014
	452.62	I	4	4	0.051
	460.10	I	2	2	0.042
	466.12	I	2	4	0.012
	725.66	I	6	4	0.15
	741.41	I	6	4	0.047
	754.71	I	4	4	0.12
	771.76	I	4	4	0.030
	774.50	I	2	4	0.063
	776.92	I	6	6	0.060
	782.14	I	6	8	0.098
	783.08	I	4	4	0.097
	787.82	I	6	6	0.018
	789.93	I	4	6	0.051
	792.46	I	2	4	0.021
	793.50	I	6	8	0.039
	799.79	I	4	4	0.021
	332.91	II	5	7	1.5
	352.21	II	7	7	1.4
	379.88	II	5	7	1.6
	380.52	II	7	9	1.8
	380.95	II	3	5	1.5
	385.10	II	5	7	1.8
	385.14	II	5	5	1.6
	385.47	II	3	5	2.2
	386.19	II	5	7	2.4
	386.86	II	7	9	2.7
	391.39	II	9	9	0.82
	399.02	II	5	7	0.84
	413.25	II	5	5	1.6
	427.65	II	9	7	0.76
	476.87	II	3	5	0.77
	478.13	II	5	7	1.0
	479.46	II	5	7	1.04
	481.01	II	5	5	0.99
	481.95	II	5	3	1.00
	490.48	II	5	7	0.81
	491.77	II	3	5	0.75
	507.83	II	7	7	0.77
	521.91	II	3	9	0.86
	539.21	II	5	7	1.0
	229.85	III	4	4	4.2
	234.06	III	6	6	4.2
	237.04	III	8	6	2.8
	253.18	III	2	4	4.4
	253.25	III	4	6	5.3
	257.71	III	4	6	4.3
	258.07	III	6	8	4.7
	260.12	III	2	4	4.6
	260.36	III	4	6	5.0
	260.95	III	6	8	5.7
	261.70	III	8	10	6.6

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Cl	266.16	II	4	6	3.4
	266.55	II	6	8	4.8
	269.15	II	4	4	3.5
	271.04	II	4	6	3.5
	334.04	II	6	6	1.5
	339.29	II	4	4	1.9
	339.35	II	6	6	1.9
	353.00	II	6	8	1.8
	356.07	II	4	6	1.7
	360.21	II	6	8	1.7
	361.29	II	4	6	1.2
	372.05	II	4	6	1.7
Co	228.780	I	8	8	0.86
	229.522	I	10	8	0.22
	230.903	I	10	10	0.56
	232.313	I	8	8	0.50
	232.553	I	6	8	0.11
	233.598	I	6	6	0.51
	233.866	I	4	4	0.77
	235.336	I	8	10	0.15
	235.548	I	6	8	0.13
	235.818	I	4	6	0.14
	236.506	I	10	10	0.13
	237.185	I	6	8	0.073
	238.486	I	10	8	0.24
	239.203	I	6	6	0.40
	240.206	I	8	6	0.51
	240.725	I	10	12	3.6
	241.276	I	4	6	0.65
	241.446	I	6	8	3.4
	241.529	I	4	6	3.6
	242.493	I	10	10	3.2
	243.221	I	8	8	2.6
	243.666	I	6	6	2.6
	243.904	I	4	4	2.7
	246.080	I	4	6	0.12
	246.769	I	6	8	0.070
	247.027	I	10	12	0.15
	247.664	I	10	8	0.22
	250.452	I	10	8	0.18
	251.102	I	10	10	0.92
	252.136	I	10	8	3.0
	252.897	I	8	6	2.8
	253.013	I	6	6	0.071
	253.596	I	6	4	1.9
	253.650	I	8	8	0.30
	254.425	I	4	2	3.0
	256.212	I	4	4	0.39
	256.734	I	6	6	0.30
	257.435	I	8	8	0.17
	268.534	I	6	8	0.055
	301.755	I	8	6	0.069
	304.400	I	10	10	0.19
	304.889	I	6	4	0.075
	306.182	I	8	8	0.16
	307.234	I	6	6	0.15
	308.678	I	4	4	0.19
	335.437	I	8	6	0.11
	336.711	I	10	8	0.060
Co	338.522	I	8	6	0.11
	338.816	I	6	4	0.24
	339.537	I	6	8	0.29
	340.512	I	10	10	1.0
	340.917	I	8	8	0.42
	341.234	I	8	10	0.61
	341.263	I	10	8	0.12
	341.474	I	4	4	0.088
	341.715	I	6	6	0.32
	343.158	I	8	6	0.11
	343.305	I	4	4	1.0
	344.292	I	6	4	0.12
	344.364	I	8	8	0.69
	344.917	I	6	6	0.76
	344.944	I	10	10	0.18
	345.351	I	10	12	1.1
	345.524	I	4	2	0.19
	346.280	I	4	6	0.79
	346.579	I	10	12	0.092
	347.402	I	6	8	0.56
	348.341	I	8	10	0.055
	348.940	I	8	6	1.3
	349.132	I	4	4	0.050
	349.568	I	4	6	0.49
	350.228	I	10	8	0.80
	350.263	I	6	6	0.052
	350.632	I	8	6	0.82
	350.984	I	6	8	0.32
	351.264	I	6	4	1.0
	351.348	I	8	10	0.078
	351.834	I	6	4	1.6
	352.158	I	10	8	0.18
	352.342	I	4	2	0.98
	352.685	I	10	10	0.13
	352.903	I	6	8	0.088
	352.982	I	8	10	0.46
	353.336	I	4	6	0.091
	356.089	I	4	4	0.23
	356.495	I	6	8	0.070
	356.937	I	8	8	1.5
	357.497	I	6	6	0.15
	357.536	I	8	8	0.096
	358.515	I	8	8	0.071
	358.719	I	6	6	1.4
	359.487	I	6	6	0.092
	360.208	I	4	4	0.10
	370.406	I	6	8	0.12
	374.549	I	8	8	0.075
	384.205	I	8	6	0.13
	384.547	I	8	10	0.46
	386.116	I	6	4	0.14
	387.312	I	10	8	0.12
	387.395	I	8	6	0.10
	388.187	I	6	4	0.082
	389.407	I	6	8	0.69
	389.498	I	4	2	0.088
	393.596	I	8	10	0.062
	399.531	I	8	10	0.25
	399.790	I	6	8	0.070

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Co	409.239	I	8	8	0.057
	411.053	I	6	6	0.055
	411.877	I	6	8	0.16
	412.132	I	8	10	0.19
	514.675	I	8	8	0.15
	521.270	I	10	10	0.19
	526.579	I	6	8	0.050
	528.063	I	10	8	0.28
	535.205	I	12	10	0.27
	547.709	I	6	8	0.068
	548.396	I	8	10	0.073
	608.243	I	10	10	0.054
	645.500	I	8	10	0.090
	783.812	I	8	10	0.054
	809.393	I	12	10	0.20
	837.279	I	10	10	0.087
	228.615	II	11	13	3.3
	230.785	II	9	11	2.6
	231.161	II	7	9	2.8
	231.405	II	5	7	2.8
	231.497	II	3	5	2.7
	233.036	II	5	3	1.32
	234.428	II	3	3	1.5
	235.341	II	7	7	1.9
	236.380	II	9	9	2.1
	237.862	II	11	9	1.9
	238.345	II	9	7	1.8
	238.892	II	11	11	2.8
	238.954	II	5	3	1.5
	240.417	II	3	3	1.5
	241.766	II	9	9	0.85
Cr	199.995	I	9	9	1.4
	238.330	I	9	11	0.41
	238.921	I	3	5	0.23
	240.860	I	9	7	0.67
	240.872	I	7	5	0.29
	249.257	I	3	5	0.45
	249.508	I	3	3	0.27
	249.630	I	5	7	0.56
	250.255	I	7	9	0.22
	250.431	I	7	9	0.45
	250.811	I	5	5	0.21
	250.897	I	5	3	0.38
	252.711	I	9	9	0.53
	254.955	I	3	3	0.48
	256.070	I	5	5	0.43
	257.174	I	7	5	0.64
	257.766	I	7	7	0.26
	259.184	I	9	7	0.65
	262.048	I	5	3	0.19
	267.364	I	3	3	0.18
	270.199	I	9	11	0.21
	272.650	I	5	7	0.75
	273.190	I	5	5	0.78
	273.646	I	5	3	0.75
	275.285	I	3	3	0.87
	275.709	I	5	5	0.68
	276.174	I	5	3	0.68
	276.436	I	7	7	0.37
Cr	276.990	I	7	5	1.1
	278.070	I	9	7	1.4
	287.927	I	5	7	0.21
	288.700	I	3	5	0.27
	288.922	I	9	9	0.66
	289.325	I	7	7	0.52
	289.417	I	1	3	0.33
	289.676	I	5	5	0.30
	290.548	I	3	1	1.3
	290.905	I	5	3	0.68
	291.089	I	7	5	0.34
	291.115	I	9	7	0.26
	296.764	I	7	9	0.39
	297.110	I	5	7	0.71
	297.548	I	3	5	0.89
	298.078	I	1	3	0.510
	298.864	I	5	7	0.52
	299.188	I	3	1	3.0
	299.406	I	5	5	0.25
	299.509	I	5	5	0.43
	299.657	I	5	3	2.0
	299.878	I	5	3	0.407
	300.088	I	7	5	1.6
	300.506	I	9	7	0.92
	301.372	I	3	5	0.83
	301.520	I	1	3	1.63
	302.067	I	3	3	1.5
	302.158	I	9	11	2.91
	302.436	I	5	5	1.27
	302.917	I	5	3	0.38
	303.025	I	7	7	1.1
	303.135	I	5	3	0.31
	303.419	I	7	7	0.35
	303.705	I	9	9	0.54
	304.084	I	7	5	0.74
	305.387	I	9	7	0.797
	314.844	I	9	11	0.56
	315.516	I	11	13	0.57
	316.376	I	13	15	0.60
	323.773	I	9	9	1.3
	323.809	I	11	11	0.20
	357.868	I	7	9	1.48
	359.348	I	7	7	1.50
	360.532	I	7	5	1.62
	363.980	I	13	11	1.8
	374.389	I	13	13	0.761
	375.766	I	7	7	0.413
	376.824	I	5	5	0.510
	380.480	I	9	9	0.69
	396.369	I	13	15	1.3
	396.975	I	11	13	1.2
	398.390	I	7	9	1.05
	399.112	I	5	7	1.07
	400.144	I	9	11	0.68
	403.910	I	15	15	0.67
	404.878	I	13	13	0.64
	405.878	I	11	11	0.67
	406.571	I	9	11	0.35
	416.552	I	11	13	0.75

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Cr	420.448	I	13	11	0.31
	425.433	I	7	9	0.315
	426.315	I	15	17	0.64
	427.481	I	7	7	0.307
	427.598	I	11	11	0.22
	428.042	I	13	15	0.47
	428.973	I	7	5	0.316
	429.197	I	7	5	0.24
	429.775	I	11	13	0.49
	429.805	I	9	9	0.26
	430.052	I	9	7	0.19
	430.119	I	11	9	0.26
	430.278	I	11	11	0.25
	431.966	I	5	3	0.18
	433.725	I	3	7	0.20
	437.365	I	9	9	0.28
	437.680	I	13	13	0.32
	441.386	I	7	5	0.27
	442.270	I	5	5	0.27
	442.429	I	9	7	0.21
	442.993	I	3	3	0.24
	443.216	I	1	3	0.18
	443.277	I	15	15	0.49
	444.372	I	3	1	0.45
	448.288	I	3	3	0.30
	449.055	I	9	7	0.39
	449.231	I	5	3	0.447
	449.528	I	9	7	0.20
	450.029	I	7	7	0.21
	450.684	I	13	11	0.27
	454.072	I	11	11	0.314
	456.417	I	11	13	0.51
	459.560	I	13	13	0.47
	462.247	I	7	7	0.41
	466.333	I	3	3	0.20
	466.590	I	3	3	0.30
	468.938	I	7	5	0.23
	469.846	I	9	7	0.22
	470.802	I	11	9	0.431
	471.843	I	13	11	0.34
	473.069	I	7	5	0.383
	473.733	I	9	7	0.338
	474.109	I	3	5	0.22
	475.207	I	13	13	0.62
	475.609	I	11	9	0.40
	479.249	I	7	5	0.26
	480.102	I	9	7	0.306
	481.613	I	9	9	0.18
	487.079	I	7	9	0.35
	488.701	I	9	11	0.32
	492.228	I	11	13	0.40
	496.680	I	3	1	0.30
	520.451	I	5	3	0.509
	520.602	I	5	5	0.514
	520.842	I	5	7	0.506
	524.338	I	5	3	0.219
	529.737	I	7	9	0.388
	529.799	I	7	7	0.30
	532.836	I	9	11	0.62
Cr	532.917	I	9	9	0.225
	578.311	I	3	3	0.21
	578.389	I	5	5	0.202
	578.797	I	5	7	0.235
	265.357	II	4	6	0.35
	265.859	II	2	4	0.58
	266.602	II	6	8	0.59
	266.871	II	4	2	1.4
	267.180	II	6	4	1.0
	267.283	II	8	6	0.55
	274.497	II	4	6	0.85
	278.761	II	6	6	1.5
	282.238	II	14	16	2.3
	283.563	II	10	12	2.0
	284.001	II	10	12	2.7
	284.324	II	8	10	0.64
	284.983	II	6	8	0.92
	285.135	II	8	10	2.8
	285.677	II	4	6	0.43
	285.740	II	6	8	0.28
	286.092	II	2	4	0.69
	286.257	II	8	8	0.63
	286.672	II	4	4	1.2
	286.709	II	4	4	1.1
	286.765	II	2	2	1.1
	287.043	II	6	6	1.3
	287.381	II	4	2	0.88
	288.086	II	6	4	0.79
	289.853	II	10	12	1.2
	292.181	II	8	10	0.90
	293.083	II	2	4	1.1
	293.512	II	6	8	1.8
	295.334	II	2	2	1.8
	296.603	II	10	8	0.54
	297.190	II	14	14	2.0
	297.973	II	12	12	1.8
	298.532	II	10	10	2.2
	298.918	II	8	8	2.2
	311.864	II	2	4	1.7
	312.036	II	4	6	1.5
	312.259	II	12	12	0.44
	312.869	II	4	4	0.81
	313.668	II	6	6	0.64
	458.822	II	8	6	0.12
Cs	321.28	I	2	4	0.0000119
	321.62	I	2	4	0.0000149
	322.01	I	2	4	0.000017
	322.48	I	2	4	0.000020
	323.05	I	2	4	0.000025
	323.74	I	2	4	0.000028
	324.59	I	2	4	0.0000345
	325.67	I	2	4	0.0000425
	327.05	I	2	4	0.000056
	328.86	I	2	4	0.00010
	331.31	I	2	4	0.00016
	334.75	I	2	4	0.00022
	334.88	I	2	2	0.000011
	339.79	I	2	4	0.00040
	340.00	I	2	2	0.000024

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Cs	347.68	I	2	4	0.00066
	348.00	I	2	2	0.000066
	361.14	I	2	4	0.0015
	361.73	I	2	2	0.00025
	387.61	I	2	4	0.0038
	388.86	I	2	2	0.00097
	455.53	I	2	4	0.0188
	459.32	I	2	2	0.0080
Cu	202.43	I	2	6	0.098
	216.51	I	2	4	0.51
	217.89	I	2	4	0.913
	218.17	I	2	2	1.0
	222.57	I	2	2	0.46
	224.43	I	2	4	0.0119
	244.16	I	2	2	0.020
	249.22	I	2	4	0.0311
	261.84	I	6	4	0.307
	276.64	I	4	4	0.096
	282.44	I	6	6	0.078
	296.12	I	6	8	0.0376
	306.34	I	4	4	0.0155
	319.41	I	4	4	0.0155
	324.75	I	2	4	1.39
	327.40	I	2	2	1.37
	333.78	I	6	8	0.0038
	402.26	I	2	4	0.190
	406.26	I	4	6	0.210
	424.90	I	2	2	0.195
	427.51	I	6	8	0.345
	448.04	I	2	2	0.030
	450.94	I	4	2	0.275
	453.08	I	4	2	0.084
	453.97	I	6	4	0.212
	458.70	I	8	6	0.320
	465.11	I	10	8	0.380
	470.46	I	8	8	0.055
	510.55	I	6	4	0.020
	515.32	I	2	4	0.60
	521.82	I	4	6	0.75
	522.01	I	4	4	0.150
	529.25	I	8	8	0.109
	570.02	I	4	4	0.0024
	578.21	I	4	2	0.0165
	248.97	II	5	5	0.015
	254.48	II	9	7	1.1
	268.93	II	7	7	0.41
	270.10	II	5	5	0.67
	270.32	II	3	3	1.2
	271.35	II	5	5	0.68
	276.97	II	7	7	0.61
Dy	286.27	I	17	15	0.065
	296.46	I	17	17	0.065
	314.77	I	15	17	0.11
	326.32	I	15	13	0.14
	351.10	I	15	13	0.31
	357.14	I	15	13	0.20
	375.71	I	17	19	3.0
	386.88	I	17	17	3.1
	396.75	I	17	19	0.87
Dy	404.60	I	17	15	1.5
	410.39	I	13	11	1.7
	418.68	I	17	17	1.32
	419.48	I	17	17	0.72
	421.17	I	17	19	2.08
	421.81	I	15	15	1.85
	422.11	I	15	17	1.52
	422.52	I	13	15	4.5
	426.83	I	15	15	0.036
	427.67	I	13	13	0.73
	429.20	I	15	15	0.058
	457.78	I	17	19	0.022
	458.94	I	17	15	0.13
	461.23	I	17	15	0.082
	507.77	I	17	17	0.0057
	530.16	I	17	15	0.011
	554.73	I	17	17	0.0027
	563.95	I	17	19	0.0047
	597.45	I	17	17	0.0040
	598.86	I	17	15	0.0053
	601.08	I	15	15	0.026
	608.83	I	15	13	0.035
	616.84	I	15	17	0.025
	625.91	I	17	19	0.0085
	657.94	I	17	15	0.0075
Er	386.29	I	13	13	2.5
	400.80	I	13	15	2.6
	415.11	I	13	11	1.8
Eu	237.29	I	8	6	0.19
	237.53	I	8	8	0.20
	237.97	I	8	10	0.20
	261.93	I	8	10	0.0070
	264.38	I	8	8	0.0066
	265.94	I	8	10	0.012
	268.26	I	8	6	0.012
	271.00	I	8	10	0.14
	272.40	I	8	8	0.12
	273.14	I	8	8	0.031
	273.26	I	8	6	0.037
	273.53	I	8	10	0.047
	273.86	I	8	10	0.013
	274.33	I	8	6	0.11
	274.56	I	8	6	0.050
	274.78	I	8	8	0.052
	277.29	I	8	6	0.010
	287.89	I	8	10	0.028
	289.25	I	8	8	0.10
	289.30	I	8	6	0.10
	290.90	I	8	10	0.069
	295.89	I	8	6	0.016
	305.90	I	8	8	0.038
	306.70	I	8	10	0.0091
	310.62	I	8	10	0.055
	311.14	I	8	10	0.30
	316.83	I	8	10	0.069
	318.55	I	8	10	0.0058
	321.06	I	8	8	0.11
	321.28	I	8	8	0.29
	321.38	I	8	6	0.18

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Eu	323.51	I	8	10	0.010
	324.14	I	8	8	0.023
	324.60	I	8	6	0.014
	324.76	I	8	8	0.023
	332.23	I	8	6	0.035
	333.43	I	8	6	0.34
	335.04	I	8	10	0.015
	335.37	I	8	8	0.0058
	345.71	I	8	8	0.0084
	346.79	I	8	8	0.010
	358.93	I	8	6	0.0069
	459.40	I	8	10	1.4
	462.72	I	8	8	1.3
	466.19	I	8	6	1.3
	564.58	I	8	6	0.0054
	576.52	I	8	8	0.011
	601.82	I	8	10	0.0085
	629.13	I	8	6	0.0018
	686.45	I	8	10	0.0058
	710.65	I	8	8	0.0026
F	623.97	I	6	4	0.25
	634.85	I	4	4	0.18
	641.37	I	2	4	0.11
	670.83	I	6	4	0.014
	677.40	I	6	6	0.10
	679.55	I	4	2	0.052
	683.43	I	4	4	0.21
	685.60	I	6	8	0.42
	687.02	I	2	2	0.38
	690.25	I	4	6	0.32
	690.98	I	2	4	0.22
	696.64	I	4	2	0.11
	703.75	I	4	4	0.30
	712.79	I	2	2	0.38
	730.90	I	6	8	0.47
	731.10	I	4	2	0.39
	731.43	I	4	6	0.48
	733.20	I	6	4	0.31
	739.87	I	6	6	0.31
	742.57	I	4	2	0.34
	748.27	I	4	4	0.056
	748.92	I	2	2	0.11
	751.49	I	2	2	0.052
	755.22	I	4	6	0.078
	757.34	I	2	4	0.10
	760.72	I	4	4	0.070
	775.47	I	4	6	0.30
	780.02	I	2	4	0.21
Fe	193.454	I	9	7	0.25
	193.727	I	9	7	0.22
	194.066	I	7	5	0.26
	208.412	I	9	7	0.37
	210.235	I	7	7	0.088
	211.297	I	1	3	0.19
	213.202	I	9	9	0.076
	214.519	I	7	7	0.057
	215.301	I	5	5	0.069
	216.158	I	3	5	0.050
	216.677	I	9	7	2.7
Fe	217.130	I	5	7	0.051
	217.321	I	3	5	0.083
	217.684	I	1	3	0.10
	219.120	I	1	3	0.073
	219.184	I	5	5	1.2
	219.604	I	3	3	1.2
	220.072	I	3	5	0.28
	225.951	I	9	11	0.070
	226.708	I	7	5	0.071
	227.207	I	7	9	0.038
	227.603	I	9	7	0.17
	227.711	I	7	5	37
	228.725	I	5	3	0.34
	229.252	I	7	9	0.043
	229.441	I	3	1	0.61
	230.014	I	5	7	0.080
	230.168	I	1	3	0.13
	230.342	I	1	3	0.094
	230.358	I	3	5	0.076
	230.900	I	3	5	0.15
	231.310	I	5	7	0.14
	232.036	I	7	9	0.12
	237.143	I	5	5	0.052
	237.362	I	7	7	0.067
	237.452	I	1	3	0.29
	238.183	I	3	5	0.054
	238.997	I	5	7	0.050
	246.218	I	7	5	0.15
	246.265	I	9	9	0.58
	247.978	I	5	5	1.8
	248.327	I	9	11	4.9
	248.814	I	7	9	4.7
	249.064	I	5	7	3.8
	249.115	I	3	5	3.0
	250.113	I	9	7	0.68
	251.083	I	7	5	1.3
	251.810	I	5	3	1.9
	252.285	I	9	9	2.9
	252.429	I	3	1	3.4
	252.743	I	7	7	1.9
	252.913	I	5	5	0.98
	253.561	I	1	3	0.97
	254.097	I	3	5	0.92
	254.598	I	5	7	0.67
	254.961	I	7	9	0.36
	258.454	I	11	13	0.46
	260.683	I	9	11	0.42
	261.802	I	7	7	0.40
	262.353	I	7	9	0.33
	265.615	I	13	15	0.28
	266.949	I	11	13	0.17
	267.906	I	11	11	0.19
	271.903	I	9	7	1.4
	272.090	I	7	5	1.1
	272.358	I	5	3	0.64
	273.358	I	11	9	0.86
	273.548	I	9	7	0.62
	273.731	I	3	3	0.85
	274.241	I	5	5	0.63

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$	元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Fe	274.407	I	1	3	0.35	Fe	315.627	I	7	7	0.54
	275.014	I	7	7	0.39		316.066	I	9	9	0.19
	275.633	I	3	5	0.20		316.195	I	11	13	0.12
	278.810	I	11	13	0.63		316.644	I	9	7	0.114
	289.450	I	5	5	0.62		316.885	I	5	7	0.057
	289.942	I	5	3	0.59		317.545	I	11	11	0.13
	292.069	I	5	5	0.052		317.636	I	5	3	0.092
	292.329	I	11	11	1.6		319.693	I	9	11	0.90
	292.536	I	7	9	0.18		319.953	I	9	9	0.26
	292.901	I	7	5	0.073		320.540	I	3	3	1.2
	293.690	I	9	9	0.13		321.594	I	5	5	0.80
	294.134	I	5	3	0.056		321.738	I	11	9	0.22
	294.788	I	7	7	0.20		321.958	I	7	9	0.62
	295.394	I	5	5	0.189		322.207	I	11	11	0.33
	295.465	I	5	7	0.10		322.579	I	11	13	0.88
	295.736	I	3	3	0.177		322.780	I	9	7	1.4
	296.525	I	1	3	0.116		322.825	I	5	3	0.45
	296.690	I	9	11	0.272		322.999	I	9	11	0.45
	296.936	I	3	1	0.0366		323.021	I	5	5	0.19
	297.313	I	5	7	0.135		323.096	I	7	5	0.39
	297.324	I	7	9	0.183		323.305	I	13	15	0.54
	298.053	I	7	7	0.22		323.397	I	9	9	0.20
	298.145	I	7	5	0.0654		324.696	I	5	3	0.099
	298.357	I	9	7	0.280		324.820	I	7	7	0.22
	298.729	I	9	7	0.066		325.360	I	7	9	0.18
	299.039	I	9	11	0.39		325.436	I	11	13	0.51
	299.443	I	7	5	0.44		325.759	I	7	5	0.14
	299.639	I	3	5	0.16		326.562	I	7	5	0.38
	299.951	I	11	11	0.23		326.823	I	3	3	0.059
	300.095	I	5	3	0.642		327.100	I	5	3	0.66
	300.814	I	3	1	1.07		328.026	I	9	11	0.54
	300.909	I	13	11	0.067		328.289	I	3	5	0.30
	300.957	I	9	9	0.17		328.459	I	5	5	0.054
	301.148	I	7	9	0.47		329.099	I	3	5	0.060
	301.592	I	11	9	0.059		329.202	I	7	9	0.61
	301.618	I	5	3	0.085		329.259	I	3	3	0.26
	301.763	I	3	3	0.0682		329.813	I	3	5	0.081
	301.898	I	7	7	0.13		330.597	I	5	7	0.47
	302.107	I	7	7	0.456		330.636	I	3	5	0.61
	302.403	I	3	5	0.0488		330.723	I	13	13	0.20
	302.584	I	1	3	0.348		331.474	I	5	7	0.69
	302.646	I	5	5	0.11		332.247	I	9	11	0.062
	303.163	I	3	3	0.15		332.374	I	5	5	0.30
	303.739	I	3	5	0.32		332.887	I	11	11	0.27
	304.202	I	3	5	0.049		333.766	I	11	9	0.057
	304.266	I	5	7	0.057		334.793	I	5	5	0.040
	304.760	I	5	7	0.284		335.406	I	1	3	0.077
	305.307	I	3	5	0.15		335.523	I	9	9	0.32
	305.745	I	11	9	0.44		336.955	I	9	9	0.24
	305.909	I	7	9	0.17		337.078	I	11	11	0.33
	306.724	I	9	7	0.34		338.011	I	7	7	0.24
	306.817	I	5	3	0.098		338.398	I	7	7	0.093
	307.572	I	7	5	0.29		339.265	I	7	7	0.26
	308.374	I	5	3	0.30		339.458	I	5	3	0.099
	309.158	I	3	1	0.54		339.933	I	5	5	0.38
	309.819	I	11	11	0.11		340.226	I	13	13	0.28
	310.067	I	7	7	0.14		340.644	I	3	5	0.30
	311.949	I	11	9	0.082		340.746	I	7	9	0.58
	312.043	I	9	7	0.089		341.017	I	3	5	0.47

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Fe	341.135	I	9	9	0.055
	341.313	I	5	7	0.36
	341.784	I	3	3	0.51
	341.851	I	3	1	1.3
	342.428	I	7	7	0.20
	342.501	I	9	7	0.28
	342.712	I	7	9	0.55
	342.819	I	5	5	0.21
	342.875	I	7	5	0.27
	344.099	I	7	5	0.084
	344.236	I	5	5	0.0455
	344.388	I	5	3	0.062
	344.515	I	5	7	0.28
	344.728	I	5	5	0.091
	345.033	I	3	3	0.20
	347.670	I	1	3	0.054
	347.785	I	3	1	0.042
	348.534	I	5	3	0.14
	349.529	I	9	7	0.0946
	349.710	I	7	7	0.14
	350.507	I	5	3	0.099
	350.650	I	5	5	0.071
	350.849	I	9	11	0.057
	351.044	I	1	3	0.044
	351.656	I	7	5	0.037
	352.184	I	3	5	0.096
	352.331	I	5	3	0.076
	352.408	I	7	5	0.075
	352.424	I	5	7	0.042
	352.779	I	9	9	0.20
	352.982	I	3	3	0.76
	353.656	I	5	7	0.78
	353.773	I	5	3	0.11
	353.790	I	11	11	0.084
	354.012	I	7	9	0.12
	354.108	I	9	11	0.62
	354.208	I	7	9	0.74
	354.367	I	3	5	0.18
	354.802	I	5	3	0.097
	355.211	I	3	5	0.045
	355.283	I	5	5	0.15
	355.374	I	11	9	0.81
	355.688	I	9	11	0.44
	355.950	I	3	3	0.19
	356.070	I	7	9	0.065
	356.538	I	7	9	0.38
	356.703	I	5	7	0.065
	356.842	I	5	3	0.053
	356.882	I	7	9	0.056
	357.010	I	9	11	0.677
	357.200	I	11	11	0.24
	357.339	I	5	7	0.075
	357.676	I	11	9	0.096
	357.838	I	1	3	0.063
	358.119	I	11	13	1.02
	358.220	I	13	11	0.25
	358.333	I	1	3	0.23
	358.532	I	7	7	0.13
	358.571	I	9	9	0.0375
Fe	358.698	I	5	5	0.16
	359.148	I	1	3	0.060
	359.267	I	7	5	0.040
	359.463	I	9	9	0.27
	359.530	I	5	5	0.054
	359.702	I	5	3	0.17
	359.962	I	11	9	0.18
	360.320	I	11	11	0.26
	360.382	I	3	3	0.17
	360.545	I	9	9	0.64
	360.668	I	11	13	0.82
	360.886	I	3	5	0.814
	361.016	I	13	13	0.48
	361.070	I	5	3	0.071
	361.207	I	11	13	0.075
	361.345	I	7	7	0.067
	361.519	I	3	3	0.058
	361.779	I	5	7	0.65
	361.877	I	5	7	0.73
	362.146	I	9	11	0.51
	362.200	I	7	7	0.51
	362.319	I	13	13	0.074
	362.406	I	5	3	0.054
	363.035	I	9	7	0.076
	363.146	I	7	9	0.517
	363.204	I	3	5	0.48
	363.255	I	11	9	0.052
	363.519	I	5	3	0.14
	363.786	I	9	9	0.055
	363.830	I	7	9	0.26
	364.039	I	9	11	0.38
	364.480	I	7	5	0.078
	364.582	I	1	3	0.57
	364.784	I	9	11	0.292
	364.951	I	11	9	0.42
	365.003	I	7	7	0.099
	365.147	I	7	9	0.62
	365.546	I	5	5	0.10
	365.952	I	9	9	0.058
	366.725	I	9	7	0.14
	366.915	I	9	7	0.074
	366.952	I	9	7	0.30
	367.009	I	11	13	0.076
	367.477	I	5	3	0.067
	367.631	I	9	11	0.0463
	367.731	I	5	7	0.31
	367.763	I	7	5	0.80
	367.886	I	3	5	0.041
	368.224	I	5	5	1.7
	368.411	I	9	7	0.34
	368.600	I	9	11	0.26
	368.626	I	3	1	0.12
	368.746	I	11	9	0.0801
	368.848	I	7	9	0.069
	369.073	I	11	11	0.27
	369.401	I	5	7	0.68
	369.743	I	7	7	0.21
	369.860	I	5	7	0.038
	369.915	I	5	7	0.045

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Fe	370.109	I	7	9	0.48
	370.203	I	3	1	0.35
	370.369	I	9	11	0.053
	370.382	I	1	3	0.12
	370.446	I	11	9	0.13
	370.925	I	9	7	0.156
	371.141	I	3	5	0.073
	371.841	I	7	7	0.053
	371.993	I	9	11	0.162
	372.256	I	5	5	0.0497
	372.438	I	5	7	0.13
	372.693	I	5	5	0.46
	372.709	I	5	7	0.20
	372.762	I	7	5	0.225
	373.039	I	9	11	0.13
	373.095	I	5	7	0.038
	373.240	I	5	5	0.28
	373.332	I	3	3	0.062
	373.486	I	11	11	0.902
	373.532	I	9	9	0.24
	373.713	I	7	9	0.142
	373.831	I	11	13	0.38
	374.024	I	7	9	0.14
	374.262	I	9	9	0.10
	374.336	I	5	3	0.260
	374.410	I	5	3	0.36
	374.556	I	5	7	0.115
	374.590	I	1	3	0.0733
	374.693	I	7	7	0.22
	374.826	I	3	5	0.0915
	374.948	I	9	9	0.764
	375.361	I	7	5	0.093
	375.694	I	11	11	0.24
	375.745	I	5	3	0.12
	375.823	I	7	7	0.634
	376.005	I	13	15	0.0447
	376.053	I	3	5	0.048
	376.379	I	5	5	0.544
	376.554	I	13	15	0.98
	376.667	I	5	3	0.097
	376.719	I	3	3	0.640
	376.803	I	3	1	0.084
	377.482	I	3	3	0.047
	377.851	I	7	5	0.12
	378.194	I	5	7	0.037
	378.595	I	11	13	0.042
	378.619	I	5	5	0.12
	378.716	I	5	5	0.10
	378.788	I	3	5	0.129
	378.982	I	9	7	0.039
	379.173	I	5	3	0.063
	379.387	I	3	3	0.074
	379.434	I	9	11	0.038
	379.500	I	5	7	0.115
	379.955	I	7	9	0.0732
	380.168	I	5	7	0.066
	380.200	I	11	13	0.035
	380.228	I	5	5	0.050
	380.401	I	11	9	0.047
Fe	380.535	I	9	11	0.98
	380.622	I	3	3	0.23
	380.670	I	11	11	0.54
	380.754	I	3	5	0.080
	380.873	I	9	9	0.0354
	381.076	I	5	3	0.20
	381.388	I	13	11	0.087
	381.584	I	9	7	1.3
	381.764	I	11	11	0.083
	381.950	I	7	5	0.046
	382.043	I	11	9	0.668
	382.118	I	11	13	0.70
	382.183	I	5	5	0.078
	382.588	I	9	7	0.598
	382.782	I	7	5	1.05
	383.331	I	9	9	0.0469
	383.422	I	7	5	0.453
	383.633	I	5	5	0.37
	383.926	I	9	9	0.28
	383.961	I	3	5	0.39
	384.044	I	5	3	0.470
	384.105	I	5	3	1.3
	384.326	I	9	7	0.47
	384.517	I	3	3	0.068
	384.569	I	5	7	0.049
	384.600	I	9	7	0.043
	384.641	I	11	9	0.19
	384.680	I	7	7	0.66
	384.996	I	3	1	0.606
	385.637	I	7	5	0.0464
	385.921	I	13	11	0.085
	385.991	I	9	9	0.0970
	386.552	I	3	3	0.155
	386.722	I	5	5	0.34
	387.175	I	11	11	0.067
	387.250	I	5	5	0.105
	387.376	I	11	9	0.080
	387.802	I	7	7	0.0772
	387.857	I	5	3	0.066
	388.328	I	7	7	0.16
	388.436	I	11	9	0.035
	388.551	I	3	5	0.058
	388.628	I	7	7	0.0530
	388.705	I	9	9	0.0352
	388.851	I	5	5	0.26
	388.882	I	5	3	0.27
	389.193	I	3	3	0.40
	389.339	I	11	11	0.13
	389.566	I	3	1	0.0940
	390.052	I	7	7	0.075
	390.295	I	7	7	0.214
	390.390	I	9	9	0.096
	390.675	I	5	7	0.067
	390.793	I	7	5	0.067
	390.966	I	3	5	0.053
	390.983	I	3	3	0.065
	391.427	I	3	3	0.054
	391.673	I	13	11	0.12
	391.907	I	9	9	0.039

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
			g_i	g_j	
Fe	392.520	I	1	3	0.057
	393.112	I	5	7	0.045
	394.128	I	5	5	0.084
	394.244	I	3	5	0.090
	394.699	I	9	11	0.044
	394.877	I	11	9	0.22
	394.914	I	3	3	0.039
	394.995	I	7	5	0.059
	395.116	I	3	5	0.36
	395.260	I	11	11	0.041
	395.315	I	7	9	0.037
	395.534	I	3	3	0.14
	395.596	I	3	3	0.057
	395.645	I	13	11	0.21
	395.702	I	5	7	0.16
	396.028	I	5	7	0.042
	396.310	I	3	5	0.17
	396.742	I	9	7	0.23
	396.796	I	7	9	0.063
	396.926	I	9	7	0.23
	397.039	I	3	1	0.35
	397.132	I	11	9	0.057
	397.365	I	5	7	0.066
	397.661	I	3	5	0.18
	397.774	I	5	5	0.070
	398.177	I	9	9	0.039
	398.396	I	9	7	0.076
	398.539	I	5	5	0.067
	398.986	I	5	7	0.050
	399.697	I	9	9	0.067
	399.739	I	9	11	0.15
	399.805	I	11	9	0.066
	400.376	I	3	3	0.071
	400.524	I	7	5	0.204
	400.631	I	11	9	0.047
	400.727	I	7	5	0.042
	400.971	I	3	5	0.052
	401.453	I	11	11	0.24
	401.715	I	9	11	0.045
	402.187	I	7	9	0.10
	402.472	I	7	9	0.089
	403.196	I	3	5	0.071
	404.064	I	5	7	0.044
	404.461	I	5	3	0.11
	404.581	I	9	9	0.863
	405.487	I	5	3	0.16
	405.822	I	9	7	0.049
	405.973	I	5	3	0.081
	406.244	I	3	3	0.22
	406.359	I	7	7	0.68
	406.540	I	3	1	0.19
	406.798	I	9	9	0.17
	407.077	I	7	5	0.13
	407.174	I	5	5	0.765
	407.376	I	5	3	0.16
	407.479	I	9	9	0.048
	407.663	I	9	9	0.19
	407.835	I	5	3	0.042
	407.918	I	5	5	0.051
Fe	407.984	I	1	3	0.063
	408.021	I	3	1	0.24
	408.244	I	3	3	0.038
	408.449	I	11	9	0.11
	408.500	I	3	5	0.042
	408.530	I	7	7	0.11
	408.598	I	7	5	0.050
	408.857	I	5	3	0.039
	409.818	I	7	7	0.068
	410.749	I	5	3	0.25
	410.907	I	1	3	0.045
	410.980	I	3	3	0.16
	411.296	I	11	13	0.14
	411.445	I	5	5	0.047
	411.854	I	11	13	0.58
	412.618	I	11	11	0.039
	412.761	I	1	3	0.13
	413.206	I	5	7	0.12
	413.290	I	3	5	0.094
	413.468	I	5	7	0.18
	413.700	I	3	5	0.22
	413.742	I	5	7	0.061
	414.263	I	3	5	0.074
	414.387	I	7	9	0.15
	414.937	I	11	13	0.036
	415.025	I	3	3	0.071
	415.390	I	7	9	0.23
	415.480	I	9	11	0.15
	415.680	I	5	5	0.19
	415.879	I	3	5	0.16
	417.090	I	5	5	0.061
	417.212	I	7	5	0.097
	417.564	I	3	5	0.16
	418.175	I	5	7	0.36
	418.238	I	5	5	0.049
	418.489	I	5	5	0.11
	418.704	I	7	5	0.215
	418.779	I	9	7	0.152
	419.168	I	1	3	0.048
	419.621	I	7	7	0.098
	419.830	I	11	9	0.0803
	419.864	I	5	5	0.13
	419.909	I	9	11	0.61
	420.009	I	7	7	0.040
	420.092	I	7	9	0.042
	420.203	I	9	9	0.0822
	420.367	I	7	9	0.086
	420.394	I	13	13	0.13
	420.554	I	5	5	0.036
	420.713	I	5	3	0.043
	421.034	I	3	3	0.17
	421.365	I	3	1	0.19
	421.755	I	3	5	0.23
	421.936	I	11	13	0.38
	422.034	I	3	1	0.19
	422.221	I	7	7	0.0577
	422.417	I	9	11	0.13
	422.451	I	3	5	0.071
	422.545	I	5	7	0.17

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Fe	422.642	I	3	3	0.037
	423.360	I	3	5	0.185
	423.594	I	9	9	0.188
	423.881	I	7	9	0.22
	424.037	I	5	3	0.057
	424.526	I	1	3	0.083
	424.608	I	7	5	0.057
	424.743	I	9	11	0.20
	424.822	I	3	5	0.035
	425.012	I	5	7	0.208
	425.079	I	7	7	0.10
	426.047	I	11	11	0.32
	426.783	I	1	3	0.094
	426.875	I	5	3	0.042
	427.115	I	7	9	0.182
	427.176	I	9	11	0.228
	428.240	I	7	5	0.11
	430.083	I	5	5	0.047
	430.545	I	5	3	0.060
	430.790	I	7	9	0.34
	431.508	I	5	5	0.077
	432.576	I	5	7	0.50
	432.709	I	5	5	0.078
	435.273	I	3	5	0.039
	436.977	I	9	9	0.072
	438.354	I	9	11	0.500
	438.789	I	3	3	0.039
	438.841	I	7	7	0.13
	440.129	I	7	7	0.059
	440.475	I	7	9	0.275
	441.512	I	5	7	0.119
	442.257	I	3	3	0.088
	443.061	I	3	1	0.0745
	443.322	I	5	3	0.23
	443.834	I	3	1	0.079
	444.234	I	5	5	0.0376
	444.319	I	1	3	0.11
	444.683	I	3	3	0.053
	444.772	I	3	3	0.0511
	445.438	I	5	5	0.038
	445.503	I	9	7	0.039
	446.655	I	5	7	0.12
	446.937	I	5	7	0.26
	448.161	I	3	3	0.042
	448.422	I	7	9	0.070
	448.567	I	3	3	0.11
	452.861	I	7	9	0.0544
	453.313	I	3	1	0.037
	454.785	I	5	7	0.076
	461.929	I	7	5	0.047
	466.917	I	5	3	0.040
	467.316	I	5	7	0.046
	467.885	I	7	9	0.074
	470.495	I	3	1	0.081
	473.677	I	9	11	0.049
	478.965	I	5	5	0.072
	485.974	I	5	3	0.13
	487.132	I	7	5	0.22
	487.214	I	3	3	0.24
Fe	487.821	I	1	3	0.091
	489.075	I	5	5	0.21
	489.149	I	9	7	0.29
	489.287	I	3	3	0.048
	490.331	I	3	5	0.047
	491.723	I	5	3	0.061
	491.801	I	1	3	0.040
	491.899	I	7	7	0.17
	492.050	I	11	9	0.35
	493.031	I	3	3	0.041
	496.992	I	3	3	0.18
	497.310	I	3	3	0.10
	497.860	I	5	3	0.11
	498.895	I	7	7	0.049
	499.127	I	5	7	0.082
	500.186	I	9	7	0.39
	500.404	I	5	3	0.035
	501.494	I	7	5	0.30
	502.224	I	5	3	0.26
	507.475	I	9	11	0.15
	509.078	I	7	5	0.20
	510.965	I	3	5	0.054
	512.164	I	5	5	0.079
	512.511	I	9	7	0.26
	513.369	I	11	13	0.27
	513.738	I	11	9	0.11
	515.906	I	5	3	0.13
	516.227	I	11	11	0.24
	518.426	I	5	7	0.035
	520.859	I	7	5	0.052
	523.294	I	9	11	0.14
	526.330	I	5	5	0.052
	526.655	I	7	9	0.086
	528.362	I	7	7	0.080
	530.230	I	3	5	0.063
	532.418	I	9	9	0.15
	533.993	I	5	7	0.070
	535.339	I	9	7	0.048
	536.487	I	5	7	0.55
	536.747	I	7	9	0.58
	536.996	I	9	11	0.47
	537.371	I	7	9	0.035
	538.337	I	11	13	0.56
	538.948	I	7	7	0.13
	539.829	I	5	5	0.098
	540.050	I	9	9	0.18
	541.091	I	7	9	0.48
	541.520	I	11	13	0.56
	542.407	I	13	15	0.50
	543.295	I	5	5	0.041
	544.504	I	11	11	0.20
	546.327	I	9	9	0.32
	546.639	I	9	7	0.075
	547.390	I	7	7	0.055
	548.087	I	3	1	0.12
	548.774	I	7	5	0.086
	555.489	I	9	9	0.087
	556.962	I	5	3	0.21
	557.284	I	7	5	0.21

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Fe	557.609	Ⅰ	3	1	0.21
	558.676	Ⅰ	9	7	0.19
	559.830	Ⅰ	5	5	0.18
	561.564	Ⅰ	11	9	0.17
	562.454	Ⅰ	5	5	0.053
	563.397	Ⅰ	11	13	0.087
	563.827	Ⅰ	9	7	0.040
	565.001	Ⅰ	3	5	0.050
	565.518	Ⅰ	7	9	0.053
	565.882	Ⅰ	7	7	0.036
	567.902	Ⅰ	5	7	0.036
	568.653	Ⅰ	9	11	0.044
	569.151	Ⅰ	3	1	0.062
	570.599	Ⅰ	7	9	0.067
	571.785	Ⅰ	1	3	0.050
	575.312	Ⅰ	3	5	0.070
	576.299	Ⅰ	5	7	0.10
	581.636	Ⅰ	9	11	0.037
	590.567	Ⅰ	5	3	0.12
	592.780	Ⅰ	5	3	0.051
	593.017	Ⅰ	5	7	0.16
	602.017	Ⅰ	7	9	0.11
	602.407	Ⅰ	9	11	0.13
	605.599	Ⅰ	7	9	0.070
	617.049	Ⅰ	5	5	0.13
	633.684	Ⅰ	3	3	0.049
	633.890	Ⅰ	5	3	0.048
	640.000	Ⅰ	7	9	0.055
	641.165	Ⅰ	5	7	0.035
	641.998	Ⅰ	7	7	0.13
	646.921	Ⅰ	3	3	0.090
	649.578	Ⅰ	3	3	0.060
	649.646	Ⅰ	5	5	0.085
	656.923	Ⅰ	7	9	0.065
	663.376	Ⅰ	7	7	0.036
	673.316	Ⅰ	3	1	0.039
	684.135	Ⅰ	5	7	0.036
	713.094	Ⅰ	3	5	0.043
	114.494	Ⅱ	10	12	4.8
	163.540	Ⅱ	8	6	2.4
	164.176	Ⅱ	6	4	1.8
	164.716	Ⅱ	6	6	0.52
	220.841	Ⅱ	10	10	1.8
	221.366	Ⅱ	14	14	0.44
	221.827	Ⅱ	8	10	1.9
	232.740	Ⅱ	6	4	0.59
	233.131	Ⅱ	10	8	0.29
	233.280	Ⅱ	8	6	1.5
	233.801	Ⅱ	4	4	1.1
	234.349	Ⅱ	10	8	1.7
	234.396	Ⅱ	8	6	0.29
	234.428	Ⅱ	2	4	0.82
	234.811	Ⅱ	10	8	0.51
	234.830	Ⅱ	6	6	1.2
	235.167	Ⅱ	6	6	1.7
	235.231	Ⅱ	2	4	4.2
	235.368	Ⅱ	8	8	1.3
	235.489	Ⅱ	6	4	0.24
	236.000	Ⅱ	10	10	0.24
Fe	236.029	Ⅱ	8	6	0.59
	236.202	Ⅱ	8	8	0.13
	236.386	Ⅱ	8	10	5.1
	236.483	Ⅱ	8	8	0.61
	236.577	Ⅱ	6	6	2.1
	236.659	Ⅱ	6	6	0.099
	236.860	Ⅱ	6	4	0.59
	236.995	Ⅱ	10	12	5.7
	237.050	Ⅱ	4	4	0.14
	237.374	Ⅱ	10	10	0.33
	237.519	Ⅱ	4	2	0.98
	237.927	Ⅱ	8	8	0.15
	238.076	Ⅱ	6	8	0.31
	238.204	Ⅱ	10	12	3.8
	238.290	Ⅱ	12	14	0.22
	238.325	Ⅱ	6	6	0.34
	238.439	Ⅱ	4	4	0.23
	238.837	Ⅱ	10	12	0.22
	238.863	Ⅱ	8	8	1.0
	239.010	Ⅱ	14	16	5.5
	239.077	Ⅱ	6	6	0.93
	239.542	Ⅱ	6	4	0.33
	239.562	Ⅱ	8	10	2.5
	239.924	Ⅱ	6	6	1.4
	240.006	Ⅱ	12	14	5.2
	240.129	Ⅱ	6	8	2.5
	240.443	Ⅱ	4	2	0.71
	240.489	Ⅱ	6	8	1.7
	240.666	Ⅱ	4	4	1.6
	241.052	Ⅱ	4	6	1.5
	241.107	Ⅱ	2	2	2.4
	241.331	Ⅱ	2	4	1.1
	241.545	Ⅱ	8	10	1.6
	241.844	Ⅱ	6	8	1.6
	242.321	Ⅱ	4	6	1.4
	242.836	Ⅱ	8	10	2.7
	243.287	Ⅱ	14	14	3.2
	243.406	Ⅱ	8	6	0.70
	243.424	Ⅱ	8	10	2.0
	243.473	Ⅱ	12	12	3.2
	243.930	Ⅱ	12	14	2.8
	244.511	Ⅱ	12	12	1.9
	244.580	Ⅱ	4	6	1.5
	244.647	Ⅱ	12	14	0.29
	244.720	Ⅱ	6	6	1.2
	245.398	Ⅱ	8	10	0.73
	245.571	Ⅱ	8	8	1.0
	245.878	Ⅱ	10	12	2.7
	245.897	Ⅱ	6	4	2.0
	246.044	Ⅱ	10	12	5.3
	246.128	Ⅱ	6	8	2.6
	246.186	Ⅱ	8	10	2.6
	246.652	Ⅱ	2	4	2.1
	246.951	Ⅱ	8	6	2.8
	247.261	Ⅱ	8	10	3.7
	247.512	Ⅱ	4	6	3.9
	247.554	Ⅱ	6	8	3.5
	248.105	Ⅱ	12	12	0.19
	248.444	Ⅱ	8	8	2.3

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Fe	249.234	I	10	12	0.16
	249.326	I	14	16	3.4
	250.131	I	2	2	1.4
	250.387	I	10	10	2.4
	250.834	I	8	10	2.7
	253.363	I	12	12	1.3
	253.442	I	8	8	1.2
	253.536	I	6	4	3.3
	253.549	I	10	8	0.54
	253.667	I	12	12	0.40
	253.714	I	10	10	1.4
	253.820	I	14	12	1.2
	253.850	I	8	6	0.33
	253.880	I	12	10	0.82
	253.891	I	10	8	0.78
	253.899	I	14	12	1.2
	254.052	I	2	2	1.5
	254.110	I	8	6	0.73
	254.184	I	8	6	0.77
	254.273	I	2	2	1.9
	254.338	I	10	12	0.44
	254.343	I	6	4	0.71
	254.497	I	4	6	0.40
	254.522	I	8	10	0.33
	254.544	I	8	10	0.14
	254.667	I	8	8	0.62
	254.734	I	8	8	0.20
	254.833	I	4	6	0.20
	254.859	I	10	10	0.19
	254.874	I	4	2	1.7
	254.892	I	12	10	0.48
	254.908	I	10	8	1.5
	254.940	I	4	4	1.3
	254.946	I	6	6	0.80
	254.977	I	8	6	0.25
	255.003	I	10	10	1.2
	255.015	I	8	10	0.40
	255.068	I	12	12	0.89
	255.121	I	10	8	0.32
	255.507	I	6	8	0.18
	255.545	I	4	6	0.25
	255.751	I	10	8	0.13
	255.977	I	6	8	0.24
	255.992	I	6	8	0.24
	256.028	I	4	4	1.5
	256.209	I	4	2	1.5
	256.254	I	8	6	1.5
	256.348	I	6	4	1.3
	256.622	I	8	10	2.5
	256.640	I	8	6	2.1
	256.691	I	4	2	1.1
	256.841	I	2	4	0.44
	256.978	I	2	4	1.2
	257.053	I	6	8	1.2
	257.085	I	8	6	1.7
	257.321	I	8	10	0.14
	257.436	I	6	4	1.6
	257.686	I	10	12	1.1
	257.792	I	2	2	1.3
Fe	258.241	I	6	8	0.24
	258.258	I	4	4	0.77
	258.563	I	10	10	0.36
	258.588	I	10	8	0.81
	258.795	I	8	10	1.4
	258.818	I	2	2	0.16
	259.055	I	4	6	0.091
	259.154	I	6	6	0.51
	259.278	I	14	16	2.1
	259.372	I	2	4	0.13
	259.496	I	8	8	0.10
	259.837	I	8	6	1.3
	259.940	I	10	10	2.2
	260.405	I	8	8	0.11
	260.504	I	6	8	2.1
	260.534	I	4	4	1.6
	260.542	I	6	6	0.26
	260.590	I	4	2	1.2
	260.651	I	6	6	1.8
	260.709	I	6	4	1.7
	260.913	I	8	10	0.30
	260.987	I	8	8	0.18
	261.187	I	8	8	1.1
	261.382	I	4	2	2.0
	261.762	I	6	6	0.44
	261.907	I	10	10	0.27
	262.017	I	6	6	0.13
	262.070	I	8	8	0.33
	262.167	I	2	2	0.49
	262.311	I	14	14	0.11
	262.373	I	6	6	0.22
	262.567	I	8	10	0.34
	262.650	I	4	6	0.34
	262.829	I	2	4	0.86
	262.959	I	6	8	0.62
	263.007	I	4	6	0.57
	263.105	I	4	6	0.77
	263.132	I	6	8	0.60
	263.161	I	10	12	0.53
	263.320	I	6	4	1.7
	263.669	I	4	4	0.12
	263.750	I	6	6	0.52
	263.764	I	2	4	0.83
	263.956	I	2	2	1.1
	264.201	I	6	6	0.36
	264.947	I	6	8	1.8
	265.048	I	6	8	1.6
	265.463	I	4	4	0.77
	265.825	I	8	8	0.32
	266.256	I	2	2	0.96
	266.466	I	8	10	1.5
	266.664	I	6	8	1.7
	266.722	I	4	6	0.92
	266.993	I	2	4	0.47
	267.140	I	2	4	0.56
	268.251	I	8	10	0.70
	268.300	I	4	6	0.64
	268.475	I	8	10	1.4
	269.260	I	10	12	1.2

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
			g_i	g_j	
Fe	269.733	Ⅰ	4	4	0.27
	269.746	Ⅰ	4	2	1.8
	269.920	Ⅰ	4	4	0.66
	270.399	Ⅰ	8	8	1.2
	270.713	Ⅰ	4	6	0.85
	270.905	Ⅰ	4	6	0.37
	271.184	Ⅰ	12	14	0.38
	271.239	Ⅰ	10	12	0.13
	271.441	Ⅰ	8	6	0.55
	271.622	Ⅰ	6	6	1.1
	271.656	Ⅰ	14	12	1.6
	271.787	Ⅰ	16	14	1.4
	271.864	Ⅰ	10	8	1.3
	271.930	Ⅰ	6	8	0.37
	272.206	Ⅰ	8	8	0.11
	272.274	Ⅰ	6	8	0.78
	272.488	Ⅰ	6	6	0.97
	272.738	Ⅰ	12	10	0.32
	272.754	Ⅰ	6	4	0.85
	272.891	Ⅰ	8	10	0.088
	273.073	Ⅰ	4	4	0.25
	273.294	Ⅰ	8	6	0.78
	273.955	Ⅰ	8	8	1.9
	274.140	Ⅰ	6	6	0.17
	274.320	Ⅰ	2	4	1.8
	274.648	Ⅰ	4	6	1.9
	274.698	Ⅰ	6	6	1.6
	274.918	Ⅰ	4	4	1.1
	274.932	Ⅰ	6	8	2.1
	274.949	Ⅰ	2	2	1.1
	275.329	Ⅰ	10	12	1.2
	275.491	Ⅰ	8	6	0.84
	275.573	Ⅰ	8	10	2.1
	276.181	Ⅰ	2	4	0.11
	276.234	Ⅰ	6	6	0.37
	276.366	Ⅰ	14	12	1.3
	276.513	Ⅰ	10	8	1.2
	276.750	Ⅰ	12	14	1.9
	276.936	Ⅰ	12	14	0.16
	277.469	Ⅰ	2	4	0.24
	277.691	Ⅰ	8	8	0.30
	277.930	Ⅰ	10	8	0.76
	277.991	Ⅰ	2	4	0.23
	278.004	Ⅰ	2	2	0.29
	278.369	Ⅰ	12	10	0.70
	278.519	Ⅰ	12	10	1.0
	278.724	Ⅰ	8	6	0.13
	279.389	Ⅰ	10	12	0.096
	279.663	Ⅰ	10	10	0.10
	279.929	Ⅰ	10	8	0.11
	280.978	Ⅰ	8	8	0.16
	281.709	Ⅰ	6	4	0.21
	283.156	Ⅰ	4	6	0.58
	283.309	Ⅰ	6	6	0.27
	283.571	Ⅰ	4	6	0.31
	283.822	Ⅰ	4	2	0.42
	283.951	Ⅰ	10	8	0.99
	283.980	Ⅰ	8	10	0.41
	284.065	Ⅰ	2	4	0.53
Fe	284.076	Ⅰ	10	12	0.11
	284.496	Ⅰ	2	2	0.45
	284.777	Ⅰ	4	4	0.33
	284.811	Ⅰ	6	6	0.70
	284.832	Ⅰ	6	4	1.1
	285.569	Ⅰ	8	10	0.10
	285.638	Ⅰ	6	8	0.27
	285.691	Ⅰ	8	8	0.87
	285.717	Ⅰ	6	8	0.095
	287.239	Ⅰ	10	8	0.15
	287.340	Ⅰ	8	10	0.34
	287.535	Ⅰ	8	10	0.095
	288.371	Ⅰ	12	14	0.10
	288.477	Ⅰ	6	8	0.14
	289.522	Ⅰ	8	10	0.080
	289.727	Ⅰ	6	4	0.14
	294.440	Ⅰ	4	2	0.46
	294.766	Ⅰ	6	4	0.20
	294.918	Ⅰ	10	8	0.20
	295.984	Ⅰ	8	6	0.16
	296.463	Ⅰ	2	2	0.093
	296.993	Ⅰ	8	6	0.18
	298.206	Ⅰ	4	6	0.21
	298.482	Ⅰ	6	6	0.36
	298.555	Ⅰ	2	4	0.18
	299.730	Ⅰ	6	8	0.083
	300.265	Ⅰ	4	6	0.14
	303.696	Ⅰ	6	6	0.16
	304.899	Ⅰ	4	4	0.28
	306.223	Ⅰ	12	10	0.12
	307.112	Ⅰ	2	4	0.19
	307.644	Ⅰ	4	6	0.28
	307.717	Ⅰ	14	12	0.11
	307.868	Ⅰ	6	8	0.42
	313.536	Ⅰ	6	6	0.084
	315.420	Ⅰ	10	10	0.15
	316.786	Ⅰ	8	8	0.13
	317.754	Ⅰ	8	8	0.081
	317.950	Ⅰ	6	8	0.099
	524.795	Ⅰ	4	6	1.7
	550.620	Ⅰ	12	14	1.4
	596.171	Ⅰ	10	12	0.77
	184.34	Ⅲ	9	7	4.8
	184.43	Ⅲ	7	5	4.9
	184.69	Ⅲ	5	3	5.5
	185.438	Ⅲ	3	1	5.7
	186.520	Ⅲ	7	7	6.1
	189.398	Ⅲ	11	9	5.5
	189.680	Ⅲ	13	11	5.0
	190.43	Ⅲ	5	5	5.7
	190.758	Ⅲ	15	13	5.3
	191.508	Ⅲ	13	15	6.0
	192.279	Ⅲ	11	13	5.5
	193.039	Ⅲ	9	11	5.1
	193.151	Ⅲ	9	11	5.3
	193.735	Ⅲ	7	9	5.1
	194.348	Ⅲ	5	7	5.0
	195.033	Ⅲ	13	15	5.5
	195.101	Ⅲ	11	11	5.3

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Fe	195.265	II	9	9	4.9
	195.332	II	7	7	5.1
	198.750	II	13	13	4.9
Ga	219.54	I	2	2	0.019
	219.97	I	4	2	0.033
	221.44	I	4	6	0.012
	223.59	I	4	2	0.043
	225.50	I	2	2	0.031
	225.92	I	4	6	0.031
	229.42	I	2	4	0.070
	229.79	I	4	2	0.058
	233.82	I	4	6	0.098
	237.13	I	2	2	0.057
	241.87	I	4	2	0.10
	245.01	I	2	4	0.28
	250.02	I	4	6	0.34
	265.99	I	2	2	0.12
	271.97	I	4	2	0.23
	287.42	I	2	4	1.2
	294.36	I	4	6	1.4
	294.42	I	4	4	0.27
	403.30	I	2	2	0.49
	417.20	I	4	2	0.92
	82.960	II	1	3	0.22
	141.44	II	1	3	18.8
Ge	194.47	I	3	1	0.70
	195.51	I	3	3	0.28
	198.83	I	5	3	0.25
	199.89	I	5	5	0.55
	204.17	I	1	3	1.1
	206.52	I	3	3	0.85
	206.87	I	3	5	1.2
	208.60	I	3	5	0.40
	209.43	I	5	7	0.97
	210.58	I	5	5	0.17
	225.60	I	5	5	0.032
	241.74	I	5	5	0.96
	249.80	I	1	3	0.13
	253.32	I	3	3	0.10
	258.92	I	5	3	0.051
	259.25	I	3	5	0.71
	265.12	I	5	5	2.0
	265.16	I	1	3	0.85
	269.13	I	3	3	0.61
	270.96	I	3	1	2.8
	275.46	I	5	3	1.1
	303.91	I	5	3	2.8
	312.48	I	5	5	0.031
	326.95	I	5	3	0.29
	422.66	I	1	3	0.21
	468.58	I	1	3	0.095
	101.66	II	4	6	2.1
	101.71	II	4	4	0.35
	105.50	II	2	2	0.69
	107.51	II	4	2	1.3
	123.71	II	2	4	19
	126.19	II	4	6	22
	126.47	II	4	4	3.5
	160.25	II	2	2	3.4
Ge	164.92	II	4	2	6.5
	474.18	II	2	4	0.46
	481.46	II	4	6	0.51
	482.41	II	4	4	0.086
	513.18	II	4	6	1.9
	517.85	II	6	6	0.13
	517.86	II	6	8	2.0
	589.34	II	2	4	0.92
	602.10	II	2	2	0.84
	633.64	II	2	2	0.44
	648.42	II	4	2	0.85
H	102.572	I	2	18	0.5575
	121.567	I	2	8	4.699
	372.194	I	8	392	0.0001303
	373.437	I	8	338	0.0001893
	375.015	I	8	288	0.0002834
	377.063	I	8	242	0.0004397
	379.790	I	8	200	0.0007122
	383.538	I	8	162	0.001216
	388.905	I	8	128	0.002215
	397.007	I	8	98	0.004389
	410.173	I	8	72	0.009732
	434.046	I	8	50	0.02530
	486.132	I	8	32	0.08419
	656.280	I	8	18	0.4410
	866.502	I	18	338	0.0001343
	875.048	I	18	288	0.0002021
	886.279	I	18	242	0.0003156
	901.491	I	18	200	0.0005156
	922.902	I	18	162	0.0008905
	954.597	I	18	128	0.001651
He	276.38	I	3	9	0.0111
	282.91	I	3	9	0.017
	294.51	I	3	9	0.0320
	318.77	I	3	9	0.05639
	335.46	I	1	3	0.0130
	344.76	I	1	3	0.0232
	355.44	I	9	15	0.0131
	358.73	I	9	15	0.0205
	361.36	I	1	3	0.0390
	363.42	I	9	15	0.0261
	370.50	I	9	15	0.0444
	381.96	I	9	15	0.0636
	383.36	I	3	5	0.00971
	386.75	I	9	3	0.025
	387.18	I	3	5	0.0126
	388.87	I	3	9	0.09478
	392.65	I	3	5	0.0195
	396.47	I	1	3	0.0719
	400.93	I	3	5	0.0279
	402.62	I	9	15	0.116
	412.08	I	9	3	0.0444
	414.38	I	3	5	0.0485
	438.79	I	3	5	0.0894
	443.76	I	3	1	0.033
	447.15	I	9	15	0.246
	471.32	I	9	3	0.0955
	492.19	I	3	5	0.198
	501.57	I	1	3	0.1338

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
He	504.77	I	3	1	0.0675
	587.57	I	9	15	0.7053
	667.82	I	3	5	0.6339
	706.52	I	9	3	0.2786
	728.14	I	3	1	0.1829
	836.17	I	3	9	0.00334
	946.36	I	3	9	0.00501
	960.34	I	1	3	0.00610
	970.26	I	9	3	0.00858
Hg	253.652	I	1	3	0.0800
	265.204	I	3	5	0.388
	265.513	I	3	5	0.11
	275.278	I	1	3	0.0610
	285.694	I	3	1	0.011
	289.360	I	3	3	0.16
	292.54	I	5	3	0.077
	296.73	I	1	3	0.45
	302.150	I	5	7	0.509
	302.348	I	5	5	0.094
	302.749	I	5	5	0.020
	312.566	I	3	5	0.656
	334.148	I	5	3	0.168
	365.015	I	5	7	1.3
	365.483	I	5	5	0.18
	404.656	I	1	3	0.21
	407.781	I	3	1	0.040
	410.81	I	3	1	0.030
	433.922	I	3	5	0.0288
	434.750	I	3	5	0.084
	435.834	I	3	3	0.557
	491.607	I	3	1	0.058
	502.564	I	3	3	0.00027
	546.075	I	5	3	0.487
	576.959	I	3	5	0.236
	623.44	I	1	3	0.0053
	671.64	I	1	3	0.0043
	690.75	I	3	5	0.028
	772.88	I	1	3	0.0097
I	178.28	I	4	4	2.71
	183.04	I	4	6	0.16
In	256.02	I	2	4	0.40
	271.03	I	4	6	0.40
	303.94	I	2	4	1.3
	325.61	I	4	6	1.3
	410.18	I	2	2	0.56
	451.13	I	4	2	1.02
	294.11	II	3	1	1.4
Ir	247.512	I	10	10	0.21
	250.298	I	10	12	0.32
	263.971	I	10	10	0.47
	266.198	I	10	10	0.25
	266.479	I	10	8	0.40
	269.423	I	10	12	0.48
	284.972	I	10	10	0.22
	285.331	I	10	10	0.0020
	288.264	I	10	8	0.072
	292.479	I	10	12	0.142
	293.464	I	8	10	0.20
	295.122	I	10	8	0.028
Ir	300.363	I	8	10	0.059
	316.888	I	8	10	0.0547
	322.078	I	10	8	0.24
	355.899	I	6	8	0.015
	357.372	I	8	10	0.054
	361.721	I	6	8	0.020
	362.867	I	8	8	0.028
	366.171	I	8	10	0.040
	373.477	I	8	8	0.027
	403.376	I	8	10	0.027
	406.992	I	6	8	0.036
	491.335	I	12	12	0.033
	493.924	I	10	12	0.0025
K	404.41	I	2	4	0.0124
	404.72	I	2	2	0.0124
	508.42	I	2	2	0.00350
	509.92	I	4	2	0.0070
	532.33	I	2	2	0.0063
	533.97	I	4	2	0.0126
	534.30	I	2	4	0.0040
	535.96	I	4	6	0.0046
	578.24	I	2	2	0.0123
	580.18	I	4	2	0.0246
	581.22	I	2	4	0.0028
	583.19	I	4	6	0.0032
	691.11	I	2	2	0.0272
	693.88	I	4	2	0.054
	766.49	I	2	4	0.387
	769.90	I	2	2	0.382
	255.00	II	6	4	2.0
	263.51	II	4	4	1.2
	299.24	II	6	8	2.5
	305.21	II	4	6	1.7
	320.20	II	4	4	1.8
	328.91	II	4	6	2.0
	332.24	II	6	6	1.3
	342.18	II	2	4	1.5
Kr	427.40	I	5	5	0.026
	435.14	I	3	1	0.032
	436.26	I	5	3	0.0084
	437.61	I	3	1	0.056
	440.00	I	3	5	0.020
	441.04	I	3	3	0.0044
	442.52	I	3	3	0.0097
	445.39	I	3	5	0.0078
	446.37	I	3	3	0.023
	450.24	I	3	5	0.0092
	556.22	I	5	5	0.0028
	557.03	I	5	3	0.021
	564.96	I	1	3	0.0037
	587.09	I	3	5	0.018
	690.47	I	3	5	0.013
	722.41	I	3	5	0.014
	758.74	I	3	1	0.51
	760.15	I	5	5	0.31
	768.52	I	3	1	0.49
	769.45	I	5	3	0.056
	785.48	I	1	3	0.23
	805.95	I	1	3	0.19

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
Kr	810.44	I	5	5	0.13
	811.29	I	5	7	0.36
	819.01	I	3	5	0.11
	826.32	I	3	5	0.35
	828.11	I	3	3	0.19
	829.81	I	3	3	0.32
	850.89	I	3	3	0.24
	877.67	I	3	5	0.27
	892.87	I	5	3	0.37
	425.06	II	4	4	0.12
	429.29	II	4	4	0.96
	435.55	II	6	8	1.0
	443.17	II	2	2	1.8
	443.68	II	2	4	0.66
	457.72	II	6	8	0.96
	458.30	II	6	4	0.76
	461.53	II	4	4	0.54
	461.92	II	4	6	0.81
	463.39	II	4	6	0.71
	465.89	II	6	4	0.65
	473.90	II	6	6	0.76
	476.24	II	2	4	0.42
	476.57	II	4	6	0.67
	481.18	II	2	4	0.17
	482.52	II	2	4	0.19
	483.21	II	4	2	0.73
	520.83	II	4	4	0.14
	530.87	II	4	6	0.024
	740.70	II	6	6	0.070
Li	274.12	I	2	6	0.013
	323.27	I	2	6	0.012
	460.28	I	2	4	0.197
	460.29	I	4	6	0.24
	610.35	I	2	4	0.60
	610.37	I	4	6	0.71
	670.78	I	2	4	0.372
	670.79	I	2	2	0.372
Lu	337.65	I	4	4	2.23
	356.78	I	4	6	0.59
	362.03	I	6	4	0.011
	384.12	I	6	6	0.25
	451.86	I	4	4	0.21
Mg	202.58	I	1	3	0.84
	277.98	I	9	9	5.2
	285.00	I	9	15	0.23
	285.21	I	1	3	4.95
	309.49	I	9	15	0.52
	332.99	I	1	3	0.033
	333.22	I	3	3	0.097
	333.67	I	5	3	0.16
	383.53	I	9	15	1.68
	470.30	I	3	5	0.255
	516.73	I	1	3	0.116
	517.27	I	3	3	0.346
	518.36	I	5	3	0.575
	552.84	I	3	5	0.199
	123.99	II	2	4	0.014
	124.04	II	2	2	0.014
	266.08	II	10	14	0.38

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
Mg	279.08	II	2	4	4.0
	279.55	II	2	4	2.6
	279.79	II	4	4	0.79
	279.81	II	4	6	4.8
	280.27	II	2	2	2.6
	292.88	II	2	2	1.2
	293.65	II	4	2	2.3
	310.48	II	10	14	0.81
	384.82	II	6	4	0.028
	384.83	II	4	4	0.0030
	385.04	II	4	2	0.030
	448.12	II	10	14	2.23
	921.83	II	2	4	0.36
	924.43	II	2	2	0.36
	121.90	IV	6	6	5.9
	137.55	IV	4	4	4.5
	145.96	IV	6	4	4.6
	149.55	IV	4	6	6.4
	151.07	IV	4	4	6.7
	168.30	IV	6	8	5.8
	169.88	IV	4	6	3.9
	189.39	IV	6	6	2.8
Mn	279.482	I	6	8	3.7
	279.827	I	6	6	3.6
	280.108	I	6	4	3.7
	300.765	I	6	8	0.18
	301.138	I	8	10	0.31
	301.645	I	10	12	0.29
	304.336	I	8	8	0.59
	304.457	I	10	8	0.57
	304.559	I	10	10	0.67
	304.580	I	8	10	0.17
	304.703	I	12	12	0.61
	305.436	I	8	6	0.46
	307.027	I	6	6	0.19
	307.318	I	4	4	0.37
	308.271	I	14	14	0.29
	311.068	I	6	8	0.27
	311.380	I	12	10	0.26
	311.810	I	4	6	0.17
	312.288	I	10	10	0.19
	312.685	I	8	6	0.23
	313.228	I	10	10	0.21
	313.279	I	8	8	0.27
	317.558	I	8	10	0.18
	320.111	I	4	6	0.22
	322.809	I	10	12	0.64
	323.023	I	10	12	0.19
	323.072	I	8	8	0.35
	324.088	I	6	4	0.22
	324.378	I	6	6	0.53
	325.113	I	4	2	0.23
	325.295	I	4	4	0.18
	325.614	I	4	6	0.50
	325.841	I	2	2	0.97
	326.024	I	2	4	0.38
	326.779	I	14	14	0.35
	326.872	I	6	8	0.33
	327.035	I	12	12	0.26

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
Mn	327.302	I	10	10	0.27
	329.823	I	6	4	0.28
	330.328	I	4	4	0.19
	345.366	I	8	8	0.32
	347.001	I	6	8	0.24
	351.183	I	12	12	0.27
	353.530	I	10	10	0.17
	355.981	I	6	6	0.21
	357.787	I	10	8	0.94
	359.511	I	6	4	0.18
	360.127	I	12	10	0.23
	360.753	I	8	8	0.23
	360.849	I	6	6	0.36
	361.030	I	4	4	0.42
	363.570	I	10	8	0.21
	366.040	I	12	14	0.91
	367.567	I	6	8	0.22
	367.696	I	10	12	0.73
	368.015	I	12	10	0.19
	368.209	I	8	10	0.76
	368.487	I	6	8	0.26
	370.608	I	12	14	1.4
	371.892	I	10	12	0.96
	373.194	I	8	10	1.0
	377.144	I	14	14	0.19
	377.386	I	12	12	0.25
	380.055	I	6	8	0.27
	380.672	I	10	12	0.59
	382.351	I	8	10	0.521
	382.389	I	6	6	0.231
	383.387	I	4	4	0.314
	383.437	I	6	8	0.429
	383.978	I	2	2	0.464
	384.107	I	4	6	0.33
	384.399	I	2	4	0.211
	388.946	I	12	14	0.31
	389.837	I	6	8	0.17
	389.934	I	4	6	0.24
	392.408	I	2	4	0.94
	392.648	I	6	8	0.54
	395.198	I	2	2	0.31
	395.284	I	6	6	0.41
	397.588	I	2	4	0.18
	398.216	I	4	2	0.35
	398.258	I	6	4	0.23
	398.290	I	6	4	0.55
	399.160	I	2	2	0.21
	401.191	I	8	8	0.23
	401.811	I	10	8	0.254
	403.076	I	6	8	0.17
	403.307	I	6	6	0.165
	404.136	I	10	10	0.787
	404.875	I	6	4	0.75
	405.248	I	6	8	0.38
	405.555	I	8	8	0.431
	405.894	I	4	2	0.725
	406.174	I	8	6	0.19
	406.353	I	6	6	0.169
	406.508	I	12	14	0.25
Mn	406.624	I	10	8	0.22
	407.028	I	2	2	0.23
	407.942	I	2	4	0.38
	408.295	I	4	6	0.295
	408.363	I	6	8	0.28
	408.994	I	8	10	0.17
	410.537	I	10	8	0.17
	413.503	I	12	12	0.30
	414.106	I	10	10	0.26
	414.880	I	8	8	0.23
	417.661	I	14	12	0.24
	418.999	I	12	10	0.20
	420.178	I	10	8	0.23
	423.530	I	8	6	0.917
	423.974	I	4	2	0.39
	425.767	I	2	2	0.37
	426.593	I	4	4	0.492
	428.110	I	6	6	0.23
	441.187	I	12	10	0.26
	441.489	I	8	6	0.293
	441.977	I	10	8	0.21
	443.636	I	6	4	0.437
	445.158	I	8	8	0.798
	445.301	I	4	2	0.544
	445.582	I	4	6	0.17
	445.704	I	6	4	0.234
	445.755	I	6	6	0.427
	445.826	I	6	8	0.462
	446.109	I	8	8	0.17
	446.203	I	8	10	0.700
	446.468	I	6	6	0.439
	447.014	I	4	4	0.300
	447.279	I	2	2	0.435
	447.940	I	8	10	0.34
	449.008	I	2	4	0.249
	449.890	I	4	6	0.249
	450.222	I	6	8	0.186
	460.537	I	10	12	0.36
	462.654	I	12	14	0.36
	470.971	I	8	8	0.172
	472.746	I	6	6	0.17
	473.911	I	4	4	0.240
	475.405	I	6	8	0.303
	476.153	I	2	4	0.535
	476.238	I	8	10	0.783
	476.586	I	4	6	0.41
	476.643	I	6	8	0.46
	478.343	I	8	8	0.401
	482.353	I	10	8	0.499
	601.348	I	4	6	0.172
	602.179	I	8	6	0.332
	259.372	II	7	7	2.6
	260.568	II	7	5	2.7
	293.305	II	5	3	2.0
	293.931	II	5	5	1.9
	294.920	II	5	7	1.9
	344.199	II	9	7	0.43
	346.032	II	7	5	0.32
	347.413	II	5	3	0.15

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$	元素	谱线波长① λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
			g_i	g_j					g_i	g_j	
Mn	348.290	Ⅱ	5	5	0.20	Mo	314.275	Ⅰ	3	5	0.410
	348.868	Ⅱ	3	3	0.25		314.735	Ⅰ	13	11	0.241
Mo	261.679	Ⅰ	3	5	0.734		315.519	Ⅰ	7	7	0.275
	262.985	Ⅰ	5	7	0.775		315.817	Ⅰ	7	7	0.463
	263.830	Ⅰ	5	5	0.757		317.034	Ⅰ	7	7	1.37
	264.098	Ⅰ	7	5	1.20		317.138	Ⅰ	5	7	0.203
	264.436	Ⅰ	5	7	0.196		317.559	Ⅰ	13	11	0.840
	264.946	Ⅰ	7	9	0.984		318.303	Ⅰ	11	9	0.398

续表

元素	谱线波长①		统计权重		跃迁几率
	λ/nm		g_i	g_j	$A/10^8 s^{-1}$
Mo	343.721	I	11	9	0.806
	344.266	I	3	3	0.294
	344.526	I	7	5	0.296
	344.712	I	9	11	0.875
	344.907	I	7	9	0.152
	345.260	I	7	7	0.248
	345.615	I	5	5	0.360
	345.652	I	3	3	0.296
	346.022	I	5	3	0.277
	346.078	I	9	7	0.603
	346.584	I	3	1	0.999
	346.785	I	5	7	0.263
	346.922	I	5	3	0.696
	347.092	I	3	5	0.291
	347.503	I	3	3	0.468
	347.942	I	7	5	0.226
	348.943	I	7	7	0.327
	350.441	I	7	9	0.806
	350.531	I	7	9	0.225
	350.811	I	9	9	0.159
	351.077	I	13	13	0.475
	351.755	I	11	11	0.541
	351.821	I	3	3	0.364
	352.141	I	9	11	0.606
	352.465	I	5	3	0.310
	352.498	I	7	9	0.225
	353.892	I	11	11	0.224
	354.057	I	5	3	0.446
	354.217	I	7	5	0.493
	355.271	I	9	7	0.364
	355.564	I	3	3	0.346
	355.809	I	5	7	0.543
	356.605	I	9	9	0.267
	357.064	I	15	15	0.718
	357.388	I	3	5	0.358
	358.054	I	13	11	0.549
	358.188	I	11	13	0.381
	358.557	I	7	5	0.395
	359.555	I	5	5	0.232
	359.888	I	13	11	0.567
	360.294	I	5	7	0.296
	360.407	I	9	7	0.325
	362.322	I	11	9	0.558
	362.446	I	9	11	0.527
	363.820	I	5	3	0.351
	363.821	I	5	3	0.333
	365.936	I	7	9	0.670
	366.299	I	11	11	0.348
	366.327	I	7	5	0.230
	366.481	I	11	13	0.954
	367.623	I	3	1	0.522
	368.068	I	11	11	0.296
	368.796	I	5	7	0.212
	368.897	I	11	9	0.326
	369.059	I	11	9	0.207
	369.494	I	5	7	0.636
	369.604	I	11	11	0.359
	371.575	I	9	7	0.238
	372.025	I	7	9	0.286
Mo	372.850	I	7	9	0.220
	373.341	I	13	13	0.280
	374.719	I	5	7	0.307
	374.848	I	9	11	0.395
	375.516	I	9	9	0.248
	376.088	I	9	9	0.216
	376.873	I	9	9	0.288
	376.999	I	7	9	0.246
	378.825	I	7	9	0.287
	379.825	I	7	9	0.690
	380.184	I	9	7	0.316
	380.599	I	5	5	0.244
	383.211	I	9	9	0.305
	384.725	I	3	1	0.241
	386.410	I	7	7	0.624
	386.767	I	5	3	0.222
	390.295	I	7	5	0.617
	391.955	I	11	13	0.224
	397.376	I	11	13	0.439
	398.020	I	5	3	0.270
	401.013	I	5	3	0.438
	402.101	I	9	11	0.265
	406.988	I	13	11	0.325
	410.746	I	7	5	0.202
	412.009	I	13	15	0.605
	415.740	I	13	11	0.217
	418.582	I	11	13	0.382
	418.832	I	11	13	0.332
	423.259	I	9	11	0.317
	424.602	I	11	13	0.200
	425.495	I	7	9	0.201
	427.691	I	7	9	0.285
	427.724	I	9	11	0.135
	432.614	I	5	7	0.256
	438.163	I	13	13	0.293
	438.241	I	11	13	0.383
	441.169	I	11	11	0.263
	443.495	I	9	9	0.251
	447.457	I	5	5	0.210
	449.165	I	11	11	0.209
	453.680	I	13	15	0.503
	463.308	I	3	5	0.235
	470.725	I	7	9	0.363
	473.144	I	9	11	0.449
	475.850	I	11	9	0.301
	476.018	I	11	13	0.467
	476.411	I	9	7	0.216
	481.105	I	13	11	0.436
	481.925	I	11	9	0.271
	483.051	I	9	7	0.407
	486.802	I	7	5	0.311
	504.770	I	3	1	0.261
	516.318	I	9	11	0.203
	517.294	I	5	5	0.411
	517.418	I	5	3	0.583
	523.821	I	7	9	0.374
	524.087	I	7	7	0.389
	524.280	I	7	5	0.201
	535.646	I	11	11	0.211

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
Mo	536.051	I	9	11	0.619
	536.428	I	9	9	0.226
	546.050	I	5	3	0.346
	549.376	I	7	5	0.213
	550.649	I	5	7	0.361
	553.303	I	5	5	0.372
	557.044	I	5	3	0.330
	584.971	I	3	3	0.302
	589.336	I	5	5	0.260
	589.593	I	5	7	0.312
	592.637	I	7	7	0.163
	592.888	I	7	9	0.532
	715.411	I	9	9	0.345
N	116.39	I	6	6	0.43
	116.43	I	4	4	0.43
	116.74	I	6	8	1.1
	116.85	I	4	6	1.3
	117.65	I	6	4	0.95
	117.77	I	4	2	1.3
	119.96	I	4	6	5.5
	120.02	I	4	4	5.3
	120.07	I	4	2	5.5
	131.05	I	4	6	1.3
	149.26	I	6	4	5.3
	149.28	I	4	4	0.58
	149.47	I	4	2	5.0
	409.99	I	2	4	0.034
	415.15	I	6	4	0.013
	421.48	I	4	6	0.022
	421.61	I	2	4	0.031
	421.89	I	2	2	0.012
	422.31	I	6	6	0.051
	422.49	I	4	2	0.061
	423.05	I	6	4	0.033
	439.24	I	4	2	0.0102
	493.51	I	4	2	0.0158
	519.98	I	2	2	0.023
	520.16	I	2	4	0.023
	528.12	I	6	6	0.00282
	530.94	I	4	2	0.00273
	535.66	I	4	6	0.00189
	537.83	I	2	2	0.00210
	581.65	I	4	6	0.00278
	582.95	I	6	6	0.0064
	583.46	I	2	4	0.00383
	585.40	I	6	4	0.00409
	585.60	I	4	2	0.0076
	660.62	I	4	6	0.00079
	662.25	I	6	6	0.0071
	663.69	I	4	4	0.0125
	664.50	I	8	6	0.0311
	664.65	I	2	2	0.0194
	665.35	I	6	4	0.0244
	665.65	I	4	2	0.0193
	692.67	I	4	6	0.0064
	694.52	I	6	6	0.0149
	695.16	I	2	4	0.0088
	697.92	I	6	4	0.0094
	698.20	I	4	2	0.0174
N	742.36	I	2	4	0.052
	744.23	I	4	4	0.106
	746.83	I	6	4	0.161
	108.40	II	1	3	2.0
	108.57	II	5	7	3.6
	383.84	II	5	5	0.45
	385.51	II	3	1	0.60
	391.90	II	3	3	1.00
	399.50	II	3	5	1.3
	444.70	II	3	5	1.30
	462.14	II	3	1	0.90
	463.05	II	5	5	0.84
	498.74	II	3	1	0.63
	499.44	II	3	3	0.74
	500.11	II	3	5	1.02
	500.15	II	5	7	1.08
	500.52	II	7	9	1.22
	504.51	II	5	3	0.410
	545.42	II	3	1	0.41
	549.57	II	5	5	0.30
	566.66	II	3	5	0.423
	567.96	II	5	7	0.56
	593.18	II	3	5	0.425
	594.17	II	5	7	0.56
	648.21	II	3	3	0.37
	661.06	II	5	7	0.59
	409.73	III	2	4	0.82
	410.34	III	2	2	0.82
	463.41	III	2	4	0.65
	464.06	III	4	6	0.78
	464.19	III	4	4	0.130
	171.86	IV	3	5	2.37
	348.08	IV	3	9	1.1
	405.78	IV	3	5	0.68
	638.08	IV	1	3	0.14
	711.67	IV	9	15	0.12
	123.88	V	2	4	3.41
	124.28	V	2	4	3.38
	460.37	V	2	4	0.412
	462.00	V	2	2	0.408
Na	330.24	I	2	4	0.0281
	330.30	I	2	2	0.0281
	439.00	I	2	4	0.0077
	439.33	I	4	6	0.0092
	449.42	I	2	4	0.012
	449.77	I	4	6	0.014
	466.48	I	2	4	0.0233
	466.86	I	4	6	0.025
	474.79	I	2	2	0.0063
	475.18	I	4	2	0.0127
	497.85	I	2	4	0.041
	498.28	I	4	6	0.0489
	514.88	I	2	2	0.0117
	515.34	I	4	2	0.0233
	568.26	I	2	4	0.103
	568.82	I	4	6	0.12
	589.00	I	2	4	0.622
	589.59	I	2	2	0.618
	615.42	I	2	2	0.026

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
Na	616.08	Ⅰ	4	2	0.052
	818.33	Ⅰ	2	4	0.453
	819.48	Ⅰ	4	6	0.54
	1138.1	Ⅰ	2	2	0.089
	1140.4	Ⅰ	4	2	0.176
	30.015	Ⅱ	1	3	30
	30.144	Ⅱ	1	3	49
	37.208	Ⅱ	1	3	34
	199.10	Ⅱ	4	6	8.3
	200.42	Ⅱ	2	4	4.6
	201.19	Ⅱ	6	8	8.4
	215.15	Ⅱ	2	4	4.4
	217.45	Ⅱ	4	6	5.3
	223.03	Ⅱ	6	8	3.7
	223.22	Ⅱ	4	4	3.3
	224.67	Ⅱ	4	6	2.4
	245.93	Ⅱ	4	6	3.0
	246.89	Ⅱ	2	4	2.4
	249.70	Ⅱ	6	6	1.7
Nd	378.04	Ⅱ	16	18	0.14
	380.54	Ⅱ	14	16	0.69
	380.72	Ⅱ	10	12	0.049
	386.33	Ⅱ	8	10	0.15
	394.15	Ⅱ	10	10	0.61
	395.12	Ⅱ	12	12	0.60
	397.33	Ⅱ	18	18	0.63
	397.95	Ⅱ	10	12	0.27
	399.01	Ⅱ	16	16	0.52
	401.23	Ⅱ	18	20	0.55
	406.11	Ⅱ	16	18	0.44
	410.66	Ⅱ	14	16	0.068
	410.95	Ⅱ	14	16	0.37
	413.34	Ⅱ	14	12	0.15
	415.61	Ⅱ	12	14	0.34
	420.56	Ⅱ	18	16	0.18
	428.45	Ⅱ	18	18	0.085
	430.36	Ⅱ	8	10	0.47
	432.58	Ⅱ	16	16	0.16
	435.82	Ⅱ	14	14	0.15
	438.27	Ⅱ	12	10	0.040
	440.08	Ⅱ	10	10	0.068
	445.16	Ⅱ	12	14	0.25
	445.64	Ⅱ	16	18	0.064
	446.30	Ⅱ	14	16	0.18
	495.81	Ⅱ	12	10	0.012
	513.06	Ⅱ	22	20	0.16
	519.26	Ⅱ	20	18	0.17
	524.96	Ⅱ	18	16	0.18
	527.69	Ⅱ	12	10	0.12
	529.32	Ⅱ	16	14	0.12
	530.23	Ⅱ	20	18	0.11
	531.15	Ⅱ	14	12	0.11
	531.98	Ⅱ	12	10	0.16
	535.70	Ⅱ	18	16	0.18
	537.19	Ⅱ	20	20	0.051
	548.57	Ⅱ	18	18	0.057
	559.44	Ⅱ	16	16	0.070
	562.06	Ⅱ	18	18	0.13
	568.85	Ⅱ	14	14	0.059
Nd	571.81	Ⅱ	16	16	0.087
	572.68	Ⅱ	10	10	0.056
	574.09	Ⅱ	12	12	0.072
	580.40	Ⅱ	10	10	0.046
	586.51	Ⅱ	16	18	0.013
	605.19	Ⅱ	12	10	0.011
Ne	336.99	Ⅰ	5	3	0.0076
	341.79	Ⅰ	3	5	0.0092
	344.77	Ⅰ	5	5	0.021
	345.42	Ⅰ	3	1	0.037
	347.26	Ⅰ	5	7	0.017
	350.12	Ⅰ	3	3	0.012
	352.05	Ⅰ	3	1	0.093
	363.37	Ⅰ	3	1	0.011
	453.63	Ⅰ	3	3	0.0050
	470.25	Ⅰ	3	3	0.0021
	470.89	Ⅰ	3	3	0.042
	511.37	Ⅰ	3	3	0.010
	515.44	Ⅰ	3	3	0.019
	519.13	Ⅰ	3	3	0.013
	534.11	Ⅰ	3	3	0.11
	540.06	Ⅰ	3	1	0.0090
	565.26	Ⅰ	3	3	0.0089
	585.25	Ⅰ	3	1	0.682
	586.84	Ⅰ	3	3	0.014
	588.19	Ⅰ	5	3	0.115
	591.36	Ⅰ	3	3	0.048
	594.48	Ⅰ	5	5	0.113
	596.16	Ⅰ	3	3	0.033
	597.55	Ⅰ	5	3	0.0351
	603.00	Ⅰ	3	3	0.0561
	607.43	Ⅰ	3	1	0.603
	609.62	Ⅰ	3	5	0.181
	614.31	Ⅰ	5	5	0.282
	615.03	Ⅰ	3	3	0.015
	616.36	Ⅰ	1	3	0.146
	621.73	Ⅰ	5	3	0.0637
	626.65	Ⅰ	1	3	0.249
	627.30	Ⅰ	3	3	0.0097
	630.48	Ⅰ	3	5	0.0416
	632.82	Ⅰ	5	3	0.0339
	633.09	Ⅰ	3	3	0.023
	633.44	Ⅰ	5	5	0.161
	638.30	Ⅰ	3	3	0.321
	650.65	Ⅰ	3	5	0.300
	653.29	Ⅰ	1	3	0.108
	659.90	Ⅰ	3	3	0.232
	667.83	Ⅰ	3	5	0.233
	671.70	Ⅰ	3	3	0.217
	692.95	Ⅰ	3	5	0.174
	703.24	Ⅰ	5	3	0.253
	705.91	Ⅰ	3	5	0.068
	724.52	Ⅰ	3	3	0.0935
	747.24	Ⅰ	3	3	0.040
	753.58	Ⅰ	3	3	0.43
	793.70	Ⅰ	5	5	0.0078
	811.85	Ⅰ	3	3	0.049
	812.89	Ⅰ	3	5	0.0072
	857.14	Ⅰ	3	3	0.055

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ne	864.70	I	5	5	0.0391
	868.19	I	3	3	0.21
	877.17	I	3	3	0.16
	878.38	I	3	5	0.313
	886.53	I	3	3	0.0094
	920.18	I	3	3	0.091
	953.42	I	3	3	0.063
	191.61	Ⅱ	4	4	0.69
	285.80	Ⅱ	6	6	0.79
	287.63	Ⅱ	4	6	0.78
	290.68	Ⅱ	2	4	0.55
	291.01	Ⅱ	4	2	1.7
	291.04	Ⅱ	2	4	0.59
	292.56	Ⅱ	2	2	0.56
	295.57	Ⅱ	6	4	1.2
	300.17	Ⅱ	4	4	0.87
	302.70	Ⅱ	6	6	1.4
	302.87	Ⅱ	4	2	0.85
	303.45	Ⅱ	6	8	3.1
	303.77	Ⅱ	4	4	2.1
	304.56	Ⅱ	2	2	2.5
	304.76	Ⅱ	4	6	1.8
	305.47	Ⅱ	2	4	0.94
	309.29	Ⅱ	6	6	1.3
	309.71	Ⅱ	8	8	1.3
	319.46	Ⅱ	4	4	0.52
	319.86	Ⅱ	6	8	1.7
	320.94	Ⅱ	2	4	0.60
	321.37	Ⅱ	2	4	1.7
	321.43	Ⅱ	4	6	2.2
	321.82	Ⅱ	8	10	2.6
Ne	357.46	Ⅱ	4	6	1.3
	359.42	Ⅱ	4	2	1.3
	364.49	Ⅱ	2	4	0.99
	369.42	Ⅱ	6	6	1.0
	370.96	Ⅱ	4	2	1.1
	371.31	Ⅱ	4	6	1.3
	372.71	Ⅱ	2	4	0.98
	382.98	Ⅱ	4	6	0.84
Ni	196.385	I	7	7	0.11
	197.687	I	7	9	1.1
	198.161	I	5	5	0.13
	199.025	I	5	7	0.83
	200.701	I	5	5	0.17
	200.769	I	7	7	0.090
	201.425	I	3	5	0.93
	202.540	I	7	5	0.23
	202.662	I	9	7	0.24
	204.735	I	7	5	0.18
	205.204	I	9	9	0.097
	205.550	I	5	3	0.33
	205.992	I	7	5	0.21
	206.020	I	5	3	0.23
	206.439	I	3	1	0.40
	206.952	I	5	5	0.11
	208.557	I	5	5	2.6
	208.909	I	7	5	0.097
	209.513	I	5	7	0.11
	211.443	I	5	5	0.097
	212.140	I	7	5	0.28
	212.480	I	5	3	0.38
	[illegible]	I	5	[illegible]	[illegible]

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ni	232.465	I	7	9	0.18
	232.579	I	7	9	3.5
	232.996	I	5	3	5.3
	234.554	I	9	7	2.2
	234.663	I	7	5	0.55
	234.751	I	9	9	0.22
	234.873	I	7	7	0.22
	241.931	I	7	5	0.20
	294.391	I	7	5	0.11
	298.165	I	5	3	0.28
	300.248	I	7	7	0.80
	300.362	I	5	5	0.69
	301.200	I	5	5	1.3
	303.793	I	7	7	0.28
	305.082	I	7	9	0.60
	305.431	I	5	5	0.40
	305.764	I	3	3	1.0
	306.462	I	5	7	0.11
	310.156	I	5	7	0.63
	310.188	I	5	7	0.49
	313.411	I	3	5	0.73
	322.502	I	5	3	0.093
	336.956	I	9	7	0.18
	338.057	I	5	3	1.3
	339.298	I	7	7	0.24
	341.476	I	7	9	0.55
	342.371	I	3	3	0.33
	343.356	I	7	7	0.17
	344.626	I	5	5	0.44
	345.288	I	5	7	0.098
	345.846	I	3	5	0.61
	346.166	I	7	9	0.27
	347.255	I	5	7	0.12
	348.377	I	5	3	0.14
	349.296	I	5	3	0.98
	351.033	I	3	1	1.2
	351.505	I	5	7	0.42
	352.454	I	7	5	1.0
	356.637	I	5	5	0.56
	359.770	I	3	3	0.14
	361.939	I	5	7	0.66
	402.767	I	5	7	0.13
	429.588	I	9	7	0.17
	440.154	I	9	11	0.38
	446.246	I	3	5	0.17
	447.048	I	5	7	0.19
	460.037	I	5	3	0.26
	460.499	I	9	7	0.23
	460.623	I	5	3	0.10
	464.866	I	11	9	0.24
	468.622	I	5	5	0.14
	470.154	I	9	9	0.14
	471.442	I	13	11	0.46
	471.578	I	7	7	0.20
	473.247	I	7	9	0.093
	475.243	I	3	3	0.20
	475.652	I	9	9	0.15
	478.654	I	11	11	0.18
	481.200	I	3	1	0.095
Ni	482.903	I	5	7	0.19
	483.118	I	9	7	0.16
	483.864	I	9	7	0.22
	485.541	I	5	5	0.57
	490.441	I	5	3	0.62
	491.203	I	3	3	0.15
	491.397	I	1	3	0.22
	491.836	I	9	7	0.23
	493.583	I	7	5	0.24
	493.734	I	9	9	0.12
	495.320	I	5	5	0.12
	498.017	I	9	11	0.19
	500.034	I	7	7	0.14
	501.246	I	7	7	0.11
	501.758	I	11	11	0.20
	503.537	I	7	9	0.57
	504.220	I	3	5	0.14
	504.885	I	7	7	0.16
	508.053	I	9	11	0.32
	508.111	I	7	9	0.57
	508.235	I	3	3	0.25
	508.408	I	7	9	0.31
	509.995	I	7	7	0.29
	511.540	I	11	9	0.22
	512.937	I	7	5	0.12
	515.514	I	5	5	0.11
	515.576	I	5	7	0.29
	517.657	I	5	5	0.18
	537.133	I	7	7	0.16
	547.691	I	1	3	0.095
	563.712	I	3	3	0.11
	566.402	I	5	7	0.11
	569.500	I	3	3	0.17
	608.629	I	3	5	0.11
	617.542	I	3	3	0.17
	712.224	I	5	7	0.21
	738.194	I	9	11	0.097
	742.230	I	7	5	0.18
	772.766	I	7	7	0.11
	216.555	II	10	10	2.4
	216.910	II	8	8	1.58
	217.467	II	8	10	1.43
	217.515	II	6	6	1.77
	218.461	II	4	4	2.90
	220.141	II	4	6	1.3
	220.672	II	6	8	1.66
	221.648	II	10	12	3.4
	222.040	II	6	8	2.3
	222.296	II	10	10	0.98
	222.486	II	8	8	1.55
	222.633	II	6	6	1.3
	225.385	II	4	6	1.98
	226.446	II	6	8	1.43
	227.021	II	8	10	1.56
	227.877	II	8	6	2.8
	228.709	II	6	4	2.8
	229.655	II	8	8	1.98
	229.714	II	6	4	2.70
	229.749	II	4	2	3.0

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
			g_i	g_j	
Ni	229.827	Ⅱ	6	6	2.8
	230.300	Ⅱ	8	6	2.9
	231.604	Ⅱ	10	8	2.88
	233.458	Ⅱ	8	8	0.80
	237.542	Ⅱ	6	8	0.66
	239.452	Ⅱ	8	10	1.70
	241.613	Ⅱ	6	8	2.1
	243.789	Ⅱ	8	10	0.54
	251.087	Ⅱ	8	10	0.58
	169.251	Ⅲ	11	13	7.9
	170.990	Ⅲ	9	11	6.3
	171.946	Ⅲ	5	7	6.0
	172.228	Ⅲ	3	5	5.9
	172.452	Ⅲ	3	1	6.7
	174.196	Ⅲ	9	7	5.7
	175.243	Ⅲ	7	5	5.5
	176.056	Ⅲ	5	3	6.5
	176.964	Ⅲ	11	11	6.2
	182.306	Ⅲ	9	9	5.6
O	102.82	Ⅰ	1	3	0.20
	115.22	Ⅰ	5	5	5.5
	121.76	Ⅰ	1	3	1.8
	130.22	Ⅰ	5	3	3.3
	130.49	Ⅰ	3	3	2.0
	130.60	Ⅰ	1	3	0.66
	543.52	Ⅰ	3	5	0.0061
	543.58	Ⅰ	5	5	0.0102
	543.69	Ⅰ	7	5	0.0142
	645.36	Ⅰ	3	5	0.0142
	645.44	Ⅰ	5	5	0.0237
	645.60	Ⅰ	7	5	0.0331
	665.38	Ⅰ	3	1	0.600
	715.67	Ⅰ	5	5	0.473
	747.14	Ⅰ	5	3	0.0114
	747.32	Ⅰ	5	5	0.102
	747.64	Ⅰ	5	7	0.408
	747.72	Ⅰ	3	3	0.170
	747.91	Ⅰ	3	5	0.306
	748.07	Ⅰ	1	3	0.226
	777.19	Ⅰ	5	7	0.340
	777.42	Ⅰ	5	5	0.340
	777.54	Ⅰ	5	3	0.340
	788.63	Ⅰ	3	5	0.370
	793.95	Ⅰ	7	5	0.00165
	794.32	Ⅰ	7	7	0.0417
	794.72	Ⅰ	5	5	0.058
	794.76	Ⅰ	7	9	0.373
	795.08	Ⅰ	5	7	0.331
	795.22	Ⅰ	3	5	0.313
	798.19	Ⅰ	3	3	0.12
	798.24	Ⅰ	1	3	0.16
	798.70	Ⅰ	3	5	0.21
	798.73	Ⅰ	5	5	0.072
	799.51	Ⅰ	5	7	0.29
	300.71	Ⅱ	8	10	0.84
	301.34	Ⅱ	6	8	0.74
	303.21	Ⅱ	8	10	0.85
	313.48	Ⅱ	8	6	1.23
	327.35	Ⅱ	8	6	1.14
O	337.72	Ⅱ	2	2	1.88
	339.03	Ⅱ	2	4	1.86
	340.74	Ⅱ	6	6	0.75
	374.95	Ⅱ	6	4	0.90
	391.20	Ⅱ	6	4	1.27
	391.93	Ⅱ	4	2	1.40
	397.33	Ⅱ	4	4	1.27
	406.96	Ⅱ	2	4	1.39
	406.99	Ⅱ	4	6	1.49
	407.22	Ⅱ	6	8	1.70
	407.59	Ⅱ	8	10	1.98
	408.51	Ⅱ	6	6	0.478
	408.72	Ⅱ	4	6	2.24
	408.93	Ⅱ	10	12	2.62
	409.56	Ⅱ	6	8	2.23
	409.72	Ⅱ	8	10	2.37
	410.47	Ⅱ	4	6	1.04
	410.50	Ⅱ	4	4	0.80
	411.92	Ⅱ	6	8	1.48
	413.28	Ⅱ	2	4	0.84
	427.67	Ⅱ	6	8	1.82
	427.74	Ⅱ	2	4	1.49
	428.14	Ⅱ	6	6	0.60
	428.28	Ⅱ	4	4	1.06
	428.30	Ⅱ	4	6	1.58
	429.48	Ⅱ	4	6	1.39
	430.38	Ⅱ	6	8	1.97
	432.86	Ⅱ	4	2	1.21
	434.04	Ⅱ	6	8	2.23
	434.74	Ⅱ	4	4	0.94
	435.13	Ⅱ	6	6	0.97
	441.49	Ⅱ	4	6	1.15
	441.70	Ⅱ	2	4	0.95
	448.95	Ⅱ	2	4	1.51
	449.13	Ⅱ	4	6	1.81
	459.62	Ⅱ	4	6	1.03
	460.21	Ⅱ	4	6	1.70
	460.94	Ⅱ	6	8	1.82
	464.18	Ⅱ	4	6	0.79
	470.12	Ⅱ	4	4	0.87
	470.32	Ⅱ	4	6	0.82
	470.54	Ⅱ	6	8	1.38
	494.11	Ⅱ	2	4	0.83
	494.31	Ⅱ	4	6	1.06
	520.67	Ⅱ	4	4	0.391
	662.76	Ⅱ	4	4	0.089
	672.14	Ⅱ	4	2	0.189
	688.51	Ⅱ	4	4	0.067
	689.53	Ⅱ	10	8	0.298
	690.65	Ⅱ	8	6	0.272
	690.81	Ⅱ	4	2	0.332
	691.08	Ⅱ	6	4	0.267
	110.95	Ⅲ	3	3	2.8
	176.45	Ⅲ	5	5	1.8
	177.23	Ⅲ	3	1	2.3
	239.04	Ⅲ	3	3	2.2
	295.97	Ⅲ	3	5	2.1
	311.57	Ⅲ	3	1	1.5
	312.17	Ⅲ	3	3	1.5

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
O	313.29	III	3	5	1.4
	326.10	III	5	7	1.8
	326.55	III	7	9	2.1
	326.73	III	3	5	1.7
	371.51	III	5	7	1.1
	396.16	III	5	7	1.3
P	167.17	I	4	2	0.39
	167.46	I	4	4	0.40
	167.97	I	4	6	0.39
	177.50	I	4	6	2.17
	178.29	I	4	4	2.14
	178.77	I	4	2	2.13
	213.55	I	4	4	0.211
	213.62	I	6	4	2.83
	214.91	I	4	2	3.18
	215.29	I	2	4	0.485
	215.41	I	4	6	0.58
	253.40	I	2	4	0.200
	253.56	I	4	4	0.95
	255.33	I	2	2	0.71
	255.49	I	4	2	0.300
	130.19	II	1	3	0.50
	130.45	II	3	1	1.5
	130.47	II	3	3	0.37
	130.55	II	3	5	0.38
	130.99	II	5	3	0.62
	131.07	II	5	5	1.1
	447.53	II	5	7	1.3
	449.92	II	5	7	1.4
	453.08	II	3	5	1.0
	455.48	II	3	5	0.96
	458.80	II	5	7	1.7
	458.99	II	3	5	1.6
	460.21	II	7	9	1.9
	494.35	II	7	5	0.63
	525.35	II	3	5	1.0
	542.59	II	5	5	0.69
	602.42	II	3	5	0.51
	604.31	II	5	7	0.68
	133.48	III	2	4	0.55
	134.43	III	4	6	0.64
	134.48	III	4	4	0.11
	405.74	III	4	4	0.10
	405.93	III	6	4	0.90
	408.01	III	4	2	0.99
Pb	202.20	I	1	3	0.052
	205.33	I	1	3	0.12
	217.00	I	1	3	1.5
	240.19	I	3	3	0.19
	244.62	I	3	3	0.25
	247.64	I	3	5	0.28
	257.73	I	5	3	0.50
	261.37	I	3	3	0.27
	261.42	I	3	5	1.9
	262.83	I	5	3	0.031
	265.71	I	3	5	0.00098
	266.32	I	5	5	0.71
	280.20	I	5	7	1.6
	282.32	I	5	5	0.26
Pb	283.31	I	1	3	0.58
	287.33	I	5	5	0.37
	357.27	I	5	3	0.99
	363.96	I	3	3	0.34
	367.15	I	5	3	0.44
	368.35	I	3	1	1.5
	373.99	I	5	5	0.73
	401.96	I	5	7	0.035
	405.78	I	5	3	0.89
	406.21	I	5	3	0.92
	416.80	I	5	5	0.012
	500.54	I	1	3	0.27
	520.14	I	1	3	0.19
	722.90	I	5	3	0.0089
Pr	399.70	II	15	15	0.187
	406.28	II	13	15	1.00
	410.07	II	17	19	0.84
	414.31	II	15	17	0.58
	417.94	II	13	15	0.52
	422.29	II	11	13	0.391
	424.10	II	17	15	0.230
	435.98	II	15	15	0.11
	440.58	II	17	17	0.090
	442.93	II	15	15	0.228
	444.98	II	13	13	0.124
	446.87	II	11	13	0.154
	451.02	II	13	15	0.116
	453.42	II	15	17	0.049
	473.42	II	15	13	0.025
	487.91	II	15	15	0.018
	488.60	II	15	15	0.013
	491.26	II	17	15	0.057
	503.44	II	19	19	0.11
	511.08	II	21	19	0.278
	513.51	II	17	17	0.125
	517.39	II	19	17	0.318
	521.91	II	15	15	0.095
	522.01	II	17	15	0.235
	525.17	II	15	13	0.011
	525.97	II	15	13	0.224
	529.26	II	13	13	0.093
	581.06	II	17	19	0.023
	587.93	II	15	15	0.076
	620.08	II	15	17	0.018
	627.87	II	13	15	0.026
	639.80	II	11	13	0.019
Rb	302.25	I	2	4	0.0000413
	303.20	I	2	4	0.0000493
	304.42	I	2	4	0.000082
	306.02	I	2	4	0.000105
	308.20	I	2	4	0.000149
	311.26	I	2	4	0.00025
	311.31	I	2	2	0.00013
	315.75	I	2	4	0.000338
	315.83	I	2	2	0.00020
	322.80	I	2	4	0.00064
	322.92	I	2	2	0.00038
	334.87	I	2	4	0.00137
	335.08	I	2	2	0.00089

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Rb	358.71	I	2	4	0.00397
	359.16	I	2	2	0.0029
	420.18	I	2	4	0.018
	421.55	I	2	2	0.015
	780.03	I	2	4	0.370
	794.76	I	2	2	0.340
	308.396	I	8	6	0.048
Rh	311.491	I	6	4	0.0445
	312.176	I	6	6	0.11
	312.370	I	10	8	0.046
	313.771	I	4	6	0.033
	318.905	I	6	6	0.303
	319.713	I	6	4	0.0435
	326.314	I	6	6	0.13
	327.161	I	6	4	0.20
	328.055	I	8	8	0.236
	328.357	I	6	8	0.44
	328.914	I	4	4	0.10
	332.309	I	8	10	0.63
	333.109	I	4	2	0.0540
	333.854	I	8	6	0.035
	336.080	I	4	4	0.12
	336.838	I	6	4	0.11
	339.682	I	10	10	0.65
	339.970	I	6	8	0.12
	346.204	I	6	6	0.62
	347.066	I	4	4	0.85
	347.891	I	6	6	0.332
	348.404	I	6	8	0.0093
	349.873	I	4	6	0.212
	350.252	I	10	10	0.43
	350.732	I	6	8	0.34
	352.802	I	8	8	0.85
	354.395	I	4	4	0.465
	354.954	I	6	6	0.222
	357.018	I	4	6	0.182
	358.310	I	8	10	0.26
	359.619	I	6	4	0.55
	359.715	I	6	8	0.59
	361.247	I	4	2	0.890
	362.046	I	6	4	0.085
	365.487	I	8	8	0.060
	365.799	I	8	6	0.88
	366.622	I	6	8	0.084
	369.070	I	6	4	0.323
	369.236	I	10	8	0.91
	370.091	I	8	10	0.39
	371.302	I	4	4	0.083
	378.847	I	4	6	0.14
	379.322	I	8	6	0.42
	379.931	I	8	8	0.55
	380.676	I	6	6	0.062
	381.819	I	6	4	0.58
	382.226	I	6	6	0.85
	382.848	I	6	6	0.62
	383.389	I	6	4	0.58
	385.652	I	8	10	0.59
	387.239	I	4	6	0.0067
	387.734	I	8	6	0.037
Rh	391.351	I	8	8	0.0025
	392.219	I	4	2	0.0625
	393.423	I	8	8	0.158
	394.272	I	4	2	0.715
	395.886	I	6	8	0.55
	398.440	I	4	4	0.11
	399.561	I	4	6	0.047
	405.344	I	2	2	0.028
	405.634	I	6	4	0.0095
	408.278	I	6	4	0.14
	409.752	I	2	4	0.070
	412.168	I	6	6	0.098
	412.887	I	6	8	0.173
	413.527	I	8	8	0.10
	419.650	I	6	8	0.039
	421.114	I	8	10	0.162
	424.444	I	4	4	0.0065
	427.860	I	4	6	0.0092
	428.871	I	6	8	0.061
	437.304	I	2	4	0.018
	437.480	I	8	10	0.164
	437.992	I	6	6	0.0248
	449.247	I	6	6	0.0045
	452.872	I	6	8	0.0135
	454.873	I	4	6	0.0055
	455.164	I	4	4	0.0400
	456.519	I	4	4	0.011
	456.900	I	6	8	0.010
	460.812	I	2	2	0.021
	467.503	I	8	8	0.0064
	472.100	I	6	4	0.00343
	474.511	I	6	6	0.0052
	475.558	I	4	4	0.0060
	484.243	I	6	8	0.0016
	496.371	I	2	2	0.030
	497.775	I	4	4	0.0098
	497.918	I	4	6	0.010
	509.063	I	6	6	0.0050
	512.069	I	6	8	0.0031
	513.076	I	4	4	0.00435
	515.554	I	2	4	0.0098
	518.419	I	6	8	0.0016
	521.273	I	4	2	0.00595
	529.214	I	10	10	0.0037
	539.044	I	4	6	0.0095
	542.472	I	4	4	0.0050
	559.942	I	6	8	0.013
	598.360	I	10	10	0.021
S	129.57	I	5	5	4.9
	129.62	I	5	3	2.7
	130.23	I	3	5	1.8
	130.29	I	3	3	1.6
	130.31	I	3	1	6.6
	130.34	I	5	3	1.9
	130.59	I	1	3	2.4
	140.15	I	5	3	0.91
	140.93	I	3	3	0.50
	141.29	I	1	3	0.16
	142.50	I	5	7	4.5

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
S	142.52	Ⅰ	5	5	1.2
	143.33	Ⅰ	3	5	3.3
	143.33	Ⅰ	3	3	1.9
	143.70	Ⅰ	1	3	2.4
	144.82	Ⅰ	5	3	7.3
	147.30	Ⅰ	5	7	0.42
	147.40	Ⅰ	5	7	1.6
	147.44	Ⅰ	5	5	0.50
	147.46	Ⅰ	5	3	0.062
	148.17	Ⅰ	3	5	0.17
	148.30	Ⅰ	3	5	1.2
	148.32	Ⅰ	3	3	0.75
	148.72	Ⅰ	1	3	0.87
	166.67	Ⅰ	5	5	6.3
	168.75	Ⅰ	1	3	0.94
	178.23	Ⅰ	1	3	1.9
	180.73	Ⅰ	5	3	3.8
	182.03	Ⅰ	3	3	2.2
	182.62	Ⅰ	1	3	0.72
	469.41	Ⅰ	5	7	0.0067
	469.54	Ⅰ	5	5	0.0067
	469.62	Ⅰ	5	3	0.0065
	640.36	Ⅰ	3	5	0.0057
	640.81	Ⅰ	5	5	0.0095
	641.55	Ⅰ	7	5	0.013
	675.12	Ⅰ	15	25	0.079
	767.96	Ⅰ	3	5	0.012
	768.61	Ⅰ	5	5	0.020
	769.67	Ⅰ	7	5	0.028
	112.44	Ⅱ	2	4	1.0
	112.50	Ⅱ	4	4	4.6
	113.10	Ⅱ	2	2	3.5
	113.16	Ⅱ	4	2	1.4
	125.05	Ⅱ	4	2	0.46
	125.38	Ⅱ	4	4	0.42
	125.95	Ⅱ	4	6	0.34
	446.36	Ⅱ	8	6	0.53
	448.34	Ⅱ	6	4	0.31
	448.67	Ⅱ	4	2	0.66
	452.47	Ⅱ	4	4	0.093
	452.50	Ⅱ	6	4	1.2
	455.24	Ⅱ	4	2	1.2
	465.67	Ⅱ	2	4	0.090
	471.62	Ⅱ	4	4	0.29
	481.55	Ⅱ	6	4	0.88
	488.56	Ⅱ	2	4	0.17
	491.72	Ⅱ	2	2	0.66
	492.41	Ⅱ	4	6	0.22
	492.53	Ⅱ	2	4	0.24
	494.25	Ⅱ	2	2	0.15
	499.19	Ⅱ	4	4	0.15
	500.95	Ⅱ	4	2	0.70
	501.40	Ⅱ	4	4	0.84
	502.72	Ⅱ	4	2	0.26
	503.24	Ⅱ	6	6	0.81
	504.73	Ⅱ	4	2	0.36
	510.33	Ⅱ	6	4	0.50
	514.23	Ⅱ	2	2	0.19
	520.10	Ⅱ	4	4	0.75
S	520.13	Ⅱ	6	4	0.065
	521.26	Ⅱ	4	6	0.098
	521.26	Ⅱ	6	6	0.85
	532.07	Ⅱ	6	8	0.92
	534.57	Ⅱ	4	6	0.88
	534.57	Ⅱ	6	6	0.11
	542.86	Ⅱ	2	4	0.42
	543.28	Ⅱ	4	6	0.68
	545.38	Ⅱ	6	8	0.85
	547.36	Ⅱ	2	2	0.73
	550.97	Ⅱ	4	4	0.40
	552.62	Ⅱ	8	8	0.081
	553.68	Ⅱ	4	6	0.066
	555.60	Ⅱ	4	2	0.11
	556.49	Ⅱ	6	6	0.17
	557.88	Ⅱ	6	6	0.11
	560.61	Ⅱ	10	8	0.54
	561.66	Ⅱ	4	4	0.12
	564.00	Ⅱ	4	6	0.66
	564.56	Ⅱ	6	4	0.018
	564.70	Ⅱ	2	4	0.57
	565.99	Ⅱ	6	4	0.46
	566.47	Ⅱ	4	2	0.58
	581.92	Ⅱ	4	4	0.085
	630.55	Ⅱ	8	6	0.18
	631.27	Ⅱ	6	4	0.30
	249.62	Ⅲ	7	5	2.5
	250.82	Ⅲ	5	3	2.3
	266.54	Ⅲ	5	5	1.4
	270.28	Ⅲ	3	1	1.9
	271.89	Ⅲ	3	3	1.2
	273.11	Ⅲ	5	5	1.1
	275.69	Ⅲ	7	7	1.4
	285.60	Ⅲ	5	7	5.1
	286.35	Ⅲ	7	9	5.7
	287.20	Ⅲ	3	5	4.7
	295.02	Ⅲ	3	5	3.0
	296.48	Ⅲ	5	7	4.0
	371.78	Ⅲ	5	3	1.0
	383.83	Ⅲ	5	5	1.3
	386.06	Ⅲ	3	1	1.6
	425.36	Ⅲ	5	7	1.2
	428.50	Ⅲ	3	5	0.90
	309.75	Ⅳ	2	4	2.6
	311.77	Ⅳ	2	2	2.5
Sc	211.67	Ⅰ	4	4	0.20
	212.04	Ⅰ	6	6	0.20
	226.23	Ⅰ	4	4	0.058
	226.66	Ⅰ	4	2	0.48
	227.09	Ⅰ	6	4	0.46
	228.08	Ⅰ	4	6	0.28
	228.96	Ⅰ	6	6	0.041
	231.129	Ⅰ	4	6	0.041
	231.569	Ⅰ	4	4	0.25
	232.032	Ⅰ	6	6	0.24
	232.475	Ⅰ	6	4	0.041
	232.819	Ⅰ	4	6	0.046
	233.467	Ⅰ	4	2	0.17
	234.603	Ⅰ	6	4	0.13

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8\,s^{-1}$
Sc	242.919	I	4	4	0.28
	243.863	I	6	6	0.21
	246.840	I	4	2	0.049
	269.278	I	4	2	0.161
	269.902	I	4	6	0.024
	270.674	I	4	4	0.31
	270.793	I	6	4	0.149
	271.134	I	6	6	0.32
	296.588	I	4	6	0.075
	297.401	I	4	4	0.55
	298.076	I	6	6	0.54
	298.897	I	6	4	0.069
	301.537	I	4	6	0.78
	301.935	I	6	8	0.87
	303.076	I	6	6	0.100
	325.568	I	4	4	0.32
	326.990	I	4	2	3.13
	327.363	I	6	4	2.81
	390.748	I	4	6	1.66
	391.181	I	6	8	1.79
	393.338	I	6	6	0.162
	399.660	I	4	6	0.165
	402.039	I	4	4	1.63
	402.322	I	4	4	0.30
	402.368	I	6	6	1.65
	403.138	I	6	6	0.29
	403.686	I	6	4	0.079
	404.380	I	8	8	0.311
	404.780	I	6	4	0.154
	405.183	I	8	6	0.077
	405.454	I	4	2	0.167
	406.700	I	6	8	0.191
	406.763	I	10	8	0.041
	407.496	I	4	6	0.37
	407.856	I	2	4	0.43
	408.057	I	4	4	0.066
	408.239	I	6	4	0.273
	408.666	I	6	8	0.37
	408.747	I	4	6	0.112
	409.312	I	4	4	0.123
	409.486	I	6	6	0.144
	409.836	I	8	8	0.087
	413.298	I	4	6	1.19
	414.027	I	6	8	1.17
	414.738	I	6	6	0.174
	416.185	I	8	8	0.177
	417.153	I	6	4	0.136
	418.642	I	6	8	0.084
	418.761	I	8	6	0.128
	419.353	I	4	6	0.061
	420.452	I	6	8	0.035
	420.520	I	10	8	0.112
	421.232	I	4	6	0.158
	421.248	I	6	6	0.086
	421.608	I	2	4	0.236
	421.823	I	4	4	0.226
	422.554	I	6	8	0.095
	422.569	I	4	6	0.076
	423.164	I	4	4	0.131
Sc	423.359	I	6	6	0.40
	423.805	I	8	8	0.71
	423.955	I	6	4	0.227
	424.614	I	8	6	0.115
	454.255	I	6	4	0.128
	454.467	I	8	6	0.133
	470.694	I	4	6	0.281
	470.931	I	6	8	0.40
	471.172	I	2	4	0.181
	471.430	I	4	4	0.214
	471.931	I	6	6	0.104
	472.877	I	8	8	0.116
	472.920	I	4	4	0.220
	472.924	I	6	6	0.193
	473.411	I	4	2	1.10
	473.765	I	6	4	0.88
	474.102	I	8	6	0.91
	474.382	I	10	8	0.98
	497.367	I	4	2	0.84
	498.036	I	6	4	0.56
	498.343	I	4	4	0.258
	499.191	I	6	6	0.38
	499.500	I	4	6	0.059
	501.841	I	6	4	0.209
	502.152	I	4	4	0.230
	506.431	I	8	10	0.073
	506.638	I	6	6	0.036
	507.017	I	6	8	0.116
	507.271	I	2	4	0.020
	507.582	I	4	6	0.115
	508.022	I	4	4	0.041
	508.156	I	10	10	0.76
	508.372	I	8	8	0.62
	508.555	I	6	6	0.57
	508.694	I	4	4	0.66
	509.672	I	6	4	0.169
	509.927	I	4	6	0.150
	510.112	I	10	8	0.088
	533.179	I	4	4	0.111
	533.943	I	6	6	0.106
	534.107	I	4	2	0.38
	534.934	I	6	4	0.59
	535.028	I	8	8	0.068
	535.579	I	6	4	0.30
	535.610	I	8	6	0.57
	537.537	I	8	6	0.34
	539.206	I	10	8	0.42
	541.616	I	4	6	0.044
	541.641	I	6	6	0.020
	542.555	I	6	8	0.045
	542.942	I	2	4	0.090
	543.298	I	4	4	0.054
	543.325	I	6	4	0.097
	543.828	I	4	6	0.034
	543.904	I	2	2	0.174
	544.262	I	4	2	0.215
	544.620	I	8	8	0.28
	545.137	I	6	6	0.150
	545.524	I	4	4	0.066

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
			g_i	g_j	
Sc	546.495	I	4	2	0.032
	546.840	I	6	4	0.097
	547.219	I	8	6	0.097
	548.201	I	8	8	0.52
	548.463	I	6	6	0.52
	551.423	I	6	8	0.41
	552.052	I	8	10	0.43
	552.610	I	4	4	0.071
	554.107	I	6	6	0.055
	563.104	I	2	4	0.030
	567.183	I	10	12	0.54
	568.686	I	8	10	0.49
	570.019	I	6	8	0.46
	570.864	I	10	10	0.047
	571.179	I	4	6	0.45
	571.731	I	8	8	0.075
	572.413	I	6	6	0.074
	598.843	I	6	6	0.066
	602.616	I	4	4	0.072
	614.620	I	6	8	0.042
	619.843	I	4	6	0.035
	624.996	I	6	8	0.032
	626.222	I	4	6	0.084
	628.016	I	2	4	0.040
	628.416	I	6	6	0.039
	628.473	I	4	4	0.071
	629.302	I	2	2	0.104
	774.116	I	10	10	0.038
	780.042	I	8	8	0.051
	188.06	II	5	3	5.0
	206.43	II	7	5	2.2
	206.80	II	5	3	2.0
	227.31	II	1	3	7.7
	254.520	II	5	5	0.40
	255.235	II	7	5	2.21
	255.579	II	3	3	0.69
	256.023	II	5	3	2.01
	256.319	II	3	1	2.70
	261.119	II	5	5	2.2
	266.770	II	3	5	1.5
	274.636	II	3	1	3.9
	278.231	II	5	5	1.3
	278.915	II	7	7	1.3
	280.131	II	9	9	1.3
	281.949	II	3	5	2.3
	282.212	II	5	7	2.5
	282.664	II	7	9	2.8
	287.085	II	5	3	1.1
	291.298	II	5	3	1.1
	297.968	II	3	5	1.2
	298.892	II	5	7	2.9
	303.992	II	7	9	3.5
	304.573	II	5	7	3.68
	305.292	II	7	9	3.92
	306.054	II	7	7	0.30
	306.512	II	5	11	4.00
	307.536	II	9	9	0.25
	312.827	II	3	3	1.9
	313.307	II	5	5	1.8
Sc	313.972	II	7	7	2.1
	319.098	II	3	3	1.1
	319.933	II	5	3	1.9
	331.272	II	5	7	1.2
	332.040	II	5	3	1.2
	334.323	II	9	7	1.1
	335.372	II	5	7	1.51
	335.967	II	5	5	0.216
	336.126	II	3	3	0.34
	336.193	II	3	1	1.17
	336.894	II	5	3	0.83
	337.215	II	7	5	0.99
	337.916	II	3	3	2.5
	353.571	II	5	3	0.61
	355.853	II	5	7	0.30
	356.770	II	3	5	0.35
	357.253	II	7	7	1.38
	357.634	II	5	5	1.06
	358.093	II	3	3	1.23
	358.963	II	5	3	0.46
	359.047	II	7	5	0.29
	361.383	II	7	9	1.48
	363.074	II	5	7	1.20
	364.278	II	3	5	1.13
	364.531	II	7	7	0.274
	365.180	II	5	5	0.30
	385.959	II	7	5	1.1
	424.682	II	5	5	1.29
	431.408	II	9	7	0.41
	432.075	II	7	5	0.40
	432.500	II	5	3	0.43
	437.446	II	9	9	0.148
	440.039	II	7	7	0.143
	441.554	II	5	5	0.147
	467.041	II	5	7	0.116
	503.101	II	5	3	0.35
	523.981	II	1	3	0.139
	552.679	II	9	7	0.33
	565.791	II	5	5	0.104
	566.906	II	3	1	0.131
Si	197.76	I	1	3	0.18
	197.92	I	3	1	0.51
	198.06	I	3	3	0.13
	198.32	I	3	5	0.14
	198.64	I	5	3	0.21
	198.90	I	5	5	0.41
	220.80	I	1	3	0.311
	221.09	I	3	5	0.416
	221.17	I	3	3	0.232
	221.67	I	5	7	0.55
	221.81	I	5	5	0.138
	250.69	I	3	5	0.466
	251.43	I	1	3	0.61
	251.61	I	5	5	1.21
	251.92	I	3	3	0.456
	252.41	I	3	1	1.81
	252.85	I	5	3	0.77
	253.24	I	1	3	0.26
	263.13	I	1	3	0.97

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Si	288.16	I	5	3	1.89
	390.55	I	1	3	0.118
	473.88	I	3	3	0.010
	478.30	I	5	3	0.017
	479.23	I	5	5	0.017
	481.81	I	5	7	0.011
	482.12	I	3	5	0.0080
	494.76	I	3	1	0.042
	500.61	I	3	5	0.028
	562.22	I	3	3	0.016
	569.04	I	3	3	0.012
	570.84	I	5	5	0.014
	575.42	I	5	3	0.015
	577.21	I	3	1	0.036
	594.85	I	3	5	0.022
	722.62	I	3	5	0.0079
	740.58	I	3	5	0.037
	740.91	I	5	7	0.023
	758.03	I	3	5	0.046
	791.84	I	3	5	0.052
	793.23	I	5	7	0.051
	794.40	I	7	9	0.058
	797.03	I	5	5	0.0071
	102.07	II	2	2	1.3
	119.04	II	2	4	6.9
	119.33	II	2	2	28
	119.45	II	4	4	36
	119.74	II	4	2	14
	124.84	II	4	4	13
	125.12	II	6	4	19
	126.04	II	2	4	20
	126.47	II	4	6	23
	130.44	II	2	2	3.6
	130.93	II	4	2	7.0
	152.67	II	2	2	3.73
	153.35	II	4	2	7.4
	180.80	II	2	4	0.037
	290.43	II	4	6	0.67
	290.57	II	6	8	0.71
	321.00	II	4	6	0.46
	412.81	II	4	6	1.32
	413.09	II	6	8	1.42
	504.10	II	2	4	0.98
	505.60	II	4	6	1.2
	595.76	II	2	2	0.42
	597.89	II	4	2	0.81
	634.71	II	2	4	0.70
	637.14	II	2	2	0.69
	784.88	II	4	6	0.39
	784.97	II	6	8	0.42
	129.45	III	3	5	5.42
	129.67	III	1	3	7.19
	129.89	III	3	3	5.36
	130.33	III	5	3	8.85
	177.87	III	7	9	4.4
	178.31	III	5	7	3.8
	324.16	III	5	3	2.3
	348.69	III	15	21	1.8
	359.05	III	3	5	3.9
Si	455.26	III	3	5	1.26
	456.78	III	3	3	1.25
	471.67	III	5	7	2.8
	547.31	III	5	7	0.79
	761.24	III	3	5	1.1
	106.66	IV	10	14	39.1
	112.25	IV	2	4	20.5
	112.83	IV	4	4	4.03
	112.83	IV	4	6	24.2
	139.38	IV	2	4	7.73
	140.28	IV	2	2	7.58
	172.41	IV	10	6	5.5
Sn	207.31	I	1	3	0.036
	219.93	I	3	5	0.29
	220.97	I	5	5	0.56
	224.61	I	1	3	1.6
	226.89	I	5	7	1.2
	228.67	I	5	5	0.31
	231.72	I	5	7	2.0
	233.48	I	3	3	0.66
	235.48	I	3	5	1.7
	238.07	I	3	5	0.031
	240.82	I	5	3	0.18
	242.17	I	5	7	2.5
	242.95	I	5	7	1.5
	243.35	I	5	3	0.0080
	245.52	I	5	5	0.011
	247.64	I	5	3	0.011
	248.34	I	5	5	0.21
	249.18	I	1	3	0.17
	249.57	I	5	5	0.62
	252.39	I	5	3	0.074
	254.66	I	1	3	0.21
	255.80	I	1	3	0.34
	257.16	I	5	7	0.45
	259.44	I	5	5	0.30
	263.69	I	1	3	0.11
	266.12	I	3	3	0.11
	270.65	I	3	5	0.66
	276.18	I	5	5	0.0037
	277.98	I	5	7	0.18
	278.50	I	5	3	0.14
	278.80	I	1	3	0.14
	281.26	I	1	3	0.23
	281.36	I	5	5	0.12
	284.00	I	5	5	1.7
	285.06	I	5	5	0.33
	286.33	I	1	3	0.54
	291.35	I	1	3	0.83
	300.91	I	3	3	0.38
	303.28	I	1	3	0.62
	303.41	I	3	1	2.0
	314.18	I	1	3	0.19
	317.51	I	5	3	1.0
	321.87	I	1	3	0.047
	322.36	I	5	5	0.0012
	326.23	I	5	3	2.7
	333.06	I	5	5	0.20
	365.58	I	1	3	0.041

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Sn	380.10	I	5	3	0.28
	452.47	I	1	3	0.26
	563.17	I	1	3	0.024
	597.03	I	5	3	0.096
	603.77	I	5	5	0.050
	606.90	I	1	3	0.046
	607.35	I	3	1	0.063
	617.15	I	3	3	0.049
	236.83	II	4	2	0.0044
	244.90	II	4	6	0.37
	248.70	II	6	8	0.55
	328.32	II	4	6	1.0
	335.20	II	6	8	1.0
	347.25	II	2	4	0.16
	357.55	II	4	6	0.13
	533.24	II	2	4	0.86
	556.20	II	4	6	1.2
	558.89	II	4	6	0.85
	559.62	II	4	4	0.15
	579.72	II	6	6	0.28
	579.92	II	6	8	0.81
	645.35	II	2	4	1.2
	676.15	II	2	2	0.32
	684.41	II	2	2	0.66
Sr	220.62	I	1	3	0.0066
	221.13	I	1	3	0.0085
	221.78	I	1	3	0.012
	222.63	I	1	3	0.016
	223.77	I	1	3	0.023
	225.33	I	1	3	0.037
	227.53	I	1	3	0.067
	230.73	I	1	3	0.12
	235.43	I	1	3	0.18
	242.81	I	1	3	0.17
	256.95	I	1	3	0.053
	293.18	I	1	3	0.019
	460.73	I	1	3	2.01
	201.87	II	2	2	0.12
	205.19	II	4	2	0.24
	228.20	II	2	4	0.83
	232.24	II	4	6	0.91
	232.45	II	4	4	0.15
	242.35	II	2	2	0.24
	247.16	II	4	2	0.48
	346.45	II	4	6	3.1
	347.49	II	4	4	0.51
	407.77	II	2	4	1.42
	416.18	II	2	2	0.65
	421.55	II	2	2	1.27
	430.55	II	4	2	1.4
	441.48	II	4	6	0.11
	441.75	II	4	4	0.018
	458.59	II	4	2	0.070
	530.31	II	2	4	0.19
	537.91	II	4	6	0.22
	538.55	II	4	4	0.037
	572.37	II	2	2	0.071
	581.90	II	4	2	0.14
	868.89	II	4	6	0.55
Ti	227.675	I	7	5	1.3
	228.000	I	9	7	0.94
	229.986	I	5	5	0.69
	230.275	I	7	7	0.57
	230.569	I	9	9	0.52
	242.426	I	9	9	0.17
	252.054	I	5	3	0.38
	252.987	I	7	5	0.38
	254.192	I	9	7	0.43
	259.991	I	5	5	0.67
	260.516	I	7	7	0.64
	261.129	I	9	9	0.64
	261.147	I	7	5	0.33
	261.994	I	9	7	0.21
	263.155	I	7	7	0.17
	263.242	I	5	5	0.27
	264.112	I	5	3	1.8
	264.428	I	7	5	1.4
	264.665	I	9	7	1.5
	273.327	I	5	5	1.9
	273.530	I	3	1	4.1
	291.207	I	5	7	1.3
	294.200	I	5	5	1.0
	294.826	I	7	7	0.93
	295.613	I	9	9	0.97
	295.680	I	7	5	0.18
	318.645	I	5	7	0.80
	319.199	I	7	9	0.85
	319.992	I	9	11	0.94
	334.188	I	5	7	0.65
	335.463	I	7	9	0.69
	337.044	I	5	3	0.76
	337.145	I	9	11	0.72
	337.758	I	7	5	0.69
	338.594	I	9	7	0.50
	363.546	I	5	7	0.804
	364.268	I	7	9	0.774
	365.350	I	9	11	0.754
	372.457	I	9	9	0.91
	372.516	I	5	3	0.73
	372.981	I	5	5	0.427
	374.106	I	7	7	0.417
	375.286	I	9	9	0.504
	378.604	I	5	3	1.4
	394.867	I	5	3	0.485
	395.634	I	7	5	0.300
	395.821	I	9	7	0.405
	398.176	I	5	5	0.376
	398.976	I	7	7	0.379
	399.864	I	9	9	0.408
	401.324	I	7	5	0.20
	405.501	I	1	3	0.28
	406.026	I	3	5	0.24
	406.420	I	3	3	0.24
	406.509	I	3	1	0.70
	418.612	I	9	9	0.210
	426.623	I	5	5	0.31
	428.499	I	5	5	0.32
	428.907	I	5	5	0.30

续表

元素	谱线波长^①^ λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$	元素	谱线波长^①^ λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
			g_i	g_j					g_i	g_j	
Ti	429.093	Ⅰ	3	3	0.45	Ti	245.118	Ⅱ	6	6	0.45
	429.575	Ⅰ	3	1	1.3		252.559	Ⅱ	10	8	0.56
	439.393	Ⅰ	9	11	0.33		253.128	Ⅱ	8	6	0.49
	441.727	Ⅰ	11	9	0.36		253.463	Ⅱ	6	4	0.54
	444.914	Ⅰ	11	11	0.97		253.589	Ⅱ	4	2	0.68
	445.090	Ⅰ	9	9	0.96		255.599	Ⅱ	6	8	0.32
	445.331	Ⅰ	5	5	0.598		263.544	Ⅱ	4	4	1.9
	445.371	Ⅰ	7	7	0.47		263.856	Ⅱ	6	6	1.7
	445.532	Ⅰ	7	7	0.48		264.202	Ⅱ	8	8	1.9
	445.743	Ⅰ	9	9	0.56		264.586	Ⅱ	10	10	2.7
	446.581	Ⅰ	5	7	0.328		274.654	Ⅱ	6	8	2.6
	448.126	Ⅰ	7	7	0.57		275.159	Ⅱ	8	10	3.7
	449.615	Ⅰ	7	5	0.44		275.268	Ⅱ	8	10	1.1
	451.802	Ⅰ	7	9	0.172		275.762	Ⅱ	6	8	0.72
	452.280	Ⅰ	5	7	0.19		275.835	Ⅱ	4	6	0.99
	452.731	Ⅰ	3	5	0.22		275.879	Ⅱ	2	4	0.44
	453.324	Ⅰ	11	11	0.883		276.428	Ⅱ	4	4	0.74
	453.478	Ⅰ	9	9	0.687		280.482	Ⅱ	6	8	4.6
	454.469	Ⅰ	5	3	0.33		281.030	Ⅱ	8	10	5.1
	454.876	Ⅰ	7	5	0.285		281.783	Ⅱ	10	12	3.8
	455.245	Ⅰ	9	7	0.21		281.987	Ⅱ	8	8	0.65
	456.343	Ⅰ	9	11	0.21		282.126	Ⅱ	6	8	0.79
	461.727	Ⅰ	7	9	0.851		282.712	Ⅱ	8	10	1.0
	462.310	Ⅰ	5	7	0.574		282.806	Ⅱ	12	14	4.4
	463.994	Ⅰ	3	3	0.664		282.864	Ⅱ	6	6	1.2
	464.043	Ⅰ	3	1	0.50		282.883	Ⅱ	10	10	0.91
	464.519	Ⅰ	3	1	0.857		283.402	Ⅱ	10	12	0.79
	465.002	Ⅰ	5	3	0.26		283.647	Ⅱ	8	8	1.2
	474.279	Ⅰ	9	9	0.53		283.964	Ⅱ	12	12	0.83
	475.812	Ⅰ	11	11	0.713		284.593	Ⅱ	10	10	1.2
	475.927	Ⅰ	13	13	0.740		285.111	Ⅱ	2	4	0.41
	477.826	Ⅰ	9	9	0.20		285.610	Ⅱ	12	12	1.5
	480.542	Ⅰ	5	7	0.58		286.233	Ⅱ	4	6	0.40
	484.087	Ⅰ	5	5	0.176		287.747	Ⅱ	8	8	0.57
	485.601	Ⅰ	13	15	0.52		288.413	Ⅱ	10	10	0.52
	488.508	Ⅰ	11	13	0.490		291.065	Ⅱ	8	8	0.46
	491.362	Ⅰ	7	9	0.444		292.664	Ⅱ	10	8	0.89
	492.834	Ⅰ	3	5	0.62		293.110	Ⅱ	6	6	3.2
	498.173	Ⅰ	11	13	0.660		293.602	Ⅱ	4	6	2.7
	498.914	Ⅰ	7	5	0.325		293.857	Ⅱ	6	8	2.4
	499.107	Ⅰ	9	11	0.584		294.190	Ⅱ	8	10	1.8
	499.950	Ⅰ	7	9	0.527		294.297	Ⅱ	8	8	1.1
	500.099	Ⅰ	9	7	0.352		294.530	Ⅱ	10	12	2.7
	500.721	Ⅰ	5	7	0.492		295.200	Ⅱ	8	8	0.30
	501.428	Ⅰ	3	5	0.68		295.459	Ⅱ	10	12	4.0
	503.647	Ⅰ	7	9	0.394		295.880	Ⅱ	8	10	4.0
	503.840	Ⅰ	5	7	0.387		297.906	Ⅱ	4	6	1.2
	506.211	Ⅰ	5	3	0.298		299.006	Ⅱ	6	8	0.56
	522.269	Ⅰ	3	3	0.195		301.717	Ⅱ	12	12	0.36
	522.430	Ⅰ	11	11	0.36		302.264	Ⅱ	10	10	1.2
	525.998	Ⅰ	5	7	0.23		302.367	Ⅱ	8	8	1.0
	535.107	Ⅰ	7	7	0.34		302.976	Ⅱ	10	10	0.35
	550.390	Ⅰ	11	9	0.26		305.675	Ⅱ	2	4	0.32
	577.404	Ⅰ	9	11	0.55		305.808	Ⅱ	6	6	0.50
	578.598	Ⅰ	11	13	0.61		306.634	Ⅱ	4	4	0.33
	580.427	Ⅰ	13	15	0.68		307.125	Ⅱ	6	4	0.36
	609.866	Ⅰ	9	7	0.25		307.299	Ⅱ	4	2	1.6
	622.046	Ⅰ	9	7	0.18		307.523	Ⅱ	6	4	1.13
	244.091	Ⅱ	4	4	0.51		307.865	Ⅱ	8	6	1.09

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
			g_i	g_j	
Ti	308.152	II	10	8	1.1
	308.804	II	10	8	1.25
	308.944	II	8	6	1.3
	309.720	II	4	6	0.44
	310.381	II	10	8	1.1
	310.510	II	2	4	0.63
	310.626	II	6	6	0.78
	311.767	II	4	2	1.1
	311.983	II	6	4	0.59
	312.786	II	6	6	1.6
	312.850	II	8	8	1.1
	316.123	II	4	2	0.59
	316.180	II	6	4	0.46
	316.259	II	8	6	0.39
	316.855	II	10	8	0.41
	318.173	II	6	8	0.46
	318.254	II	4	6	0.43
	318.949	II	4	4	0.92
	319.091	II	6	8	1.3
	320.256	II	4	6	1.1
	322.425	II	12	10	0.70
	322.862	II	4	2	2.0
	323.229	II	8	6	0.60
	323.451	II	10	10	1.38
	323.613	II	4	4	0.70
	323.658	II	8	8	1.11
	323.904	II	6	6	0.987
	323.966	II	6	4	0.94
	324.199	II	4	4	1.16
	325.191	II	6	4	0.338
	325.292	II	8	6	0.39
	327.207	II	2	4	0.32
	327.828	II	4	4	0.96
	327.891	II	6	4	1.0
	328.232	II	2	2	1.6
	328.766	II	8	10	1.4
	331.532	II	2	4	0.38
	332.170	II	4	4	0.72
	332.294	II	10	10	0.396
	332.946	II	8	8	0.325
	333.211	II	6	4	1.1
	334.034	II	4	4	0.36
	336.123	II	8	10	1.1
	337.280	II	6	8	1.11
	338.377	II	4	6	1.09
	345.249	II	2	2	0.77
	345.640	II	4	4	0.82
	346.556	II	4	2	0.41
	348.363	II	10	8	0.97
	349.237	II	8	6	0.98
	350.490	II	10	10	0.82
	351.086	II	8	8	0.93
	352.027	II	2	4	0.48
	353.541	II	4	6	0.55
	364.133	II	4	2	0.49
	370.623	II	4	4	0.31
	374.164	II	6	6	0.62
	375.770	II	4	4	0.41
	375.930	II	8	8	0.94
Ti	376.133	II	6	6	0.99
	491.118	II	6	4	0.32
	100.237	III	5	5	7.6
	100.467	III	7	5	43
	100.580	III	3	3	13
	100.716	III	5	3	38
	100.812	III	3	1	51
	128.637	III	9	9	2.0
	128.930	III	7	7	2.2
	129.162	III	5	5	2.4
	129.323	III	9	7	1.0
	129.897	III	7	5	4.9
	132.759	III	5	3	3.2
	142.044	III	1	3	1.2
	142.163	III	3	1	4.0
	142.241	III	5	5	3.0
	142.414	III	5	3	1.6
	145.519	III	9	7	6.4
	149.870	III	5	5	2.8
	200.736	III	3	3	3.4
	200.760	III	1	3	1.2
	201.080	III	5	3	5.4
	209.730	III	5	7	3.3
	209.986	III	3	5	2.5
	210.486	III	3	3	1.1
	210.509	III	1	3	1.7
	219.922	III	3	3	5.7
	223.777	III	7	7	2.4
	233.135	III	3	1	4.3
	233.166	III	3	3	1.2
	233.900	III	5	3	3.0
	234.679	III	7	5	3.3
	237.499	III	5	3	4.0
	241.399	III	5	7	3.8
	251.605	III	7	9	3.4
	256.756	III	3	3	2.3
	298.475	III	5	5	1.9
	306.651	III	3	3	2.5
	322.889	III	3	3	1.5
	327.831	III	7	9	3.4
	332.094	III	3	5	2.8
	334.020	III	7	9	3.7
	334.618	III	9	11	3.7
	335.471	III	11	13	4.4
	339.724	III	3	1	1.8
	340.446	III	3	3	1.8
	341.762	III	3	5	1.9
	391.547	III	9	11	2.1
	411.914	III	5	5	0.99
	421.326	III	9	11	2.2
	421.553	III	9	11	2.2
	424.762	III	11	13	1.1
	424.854	III	5	7	2.3
	425.009	III	3	5	0.95
	425.901	III	11	13	0.94
	426.984	III	9	11	1.7
	428.561	III	13	15	3.0
	428.866	III	11	13	1.1
	429.670	III	11	13	1.6

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
Ti	431.956	Ⅱ	9	11	1.1
	434.325	Ⅱ	3	1	1.0
	437.894	Ⅱ	3	5	1.6
	443.391	Ⅱ	11	13	1.8
	444.066	Ⅱ	1	3	1.2
	453.326	Ⅱ	3	5	1.5
	457.653	Ⅱ	9	7	1.3
	462.807	Ⅱ	3	1	1.5
	465.286	Ⅱ	7	9	2.6
	487.400	Ⅱ	5	7	1.5
	497.119	Ⅱ	9	11	2.1
	750.687	Ⅱ	11	13	1.1
	118.364	Ⅳ	2	2	6.9
	206.756	Ⅳ	2	4	5.1
	210.316	Ⅳ	2	2	5.0
	254.179	Ⅳ	4	6	6.9
	254.688	Ⅳ	6	8	7.4
	286.260	Ⅳ	4	2	4.1
	357.644	Ⅳ	4	6	4.6
Tl	210.46	Ⅰ	2	4	0.040
	211.89	Ⅰ	2	2	0.020
	212.93	Ⅰ	2	4	0.058
	215.19	Ⅰ	2	2	0.031
	216.86	Ⅰ	2	4	0.098
	223.78	Ⅰ	2	4	0.19
	231.60	Ⅰ	2	2	0.078
	237.97	Ⅰ	2	4	0.44
	250.79	Ⅰ	4	2	0.011
	253.82	Ⅰ	4	2	0.016
	258.01	Ⅰ	2	2	0.18
	260.90	Ⅰ	4	6	0.10
	260.98	Ⅰ	4	4	0.019
	266.56	Ⅰ	4	2	0.057
	270.92	Ⅰ	4	6	0.17
	271.07	Ⅰ	4	4	0.037
	276.79	Ⅰ	2	4	1.26
	282.62	Ⅰ	4	2	0.080
	291.83	Ⅰ	4	6	0.42
	292.15	Ⅰ	4	4	0.076
	322.98	Ⅰ	4	2	0.173
	351.92	Ⅰ	4	6	1.24
	352.94	Ⅰ	4	4	0.220
	377.57	Ⅰ	2	2	0.625
	535.05	Ⅰ	4	2	0.705
Tm	251.38	Ⅰ	8	10	0.069
	252.70	Ⅰ	8	8	0.17
	259.65	Ⅰ	8	10	0.16
	260.11	Ⅰ	8	6	0.17
	262.25	Ⅰ	8	10	0.061
	284.11	Ⅰ	6	6	0.20
	285.42	Ⅰ	8	6	0.27
	291.48	Ⅰ	8	8	0.077
	293.30	Ⅰ	8	6	0.10
	297.32	Ⅰ	8	8	0.23
	304.69	Ⅰ	8	8	0.18
	308.11	Ⅰ	8	8	0.19
	312.25	Ⅰ	6	6	0.52
	314.24	Ⅰ	6	6	0.088
	317.27	Ⅰ	8	8	0.18
Tm	323.37	Ⅰ	8	10	0.051
	324.70	Ⅰ	6	8	0.30
	325.18	Ⅰ	6	4	0.52
	338.07	Ⅰ	6	8	0.20
	340.60	Ⅰ	6	8	0.15
	341.01	Ⅰ	8	10	0.10
	341.66	Ⅰ	8	8	0.057
	341.86	Ⅰ	6	6	0.11
	356.39	Ⅰ	8	6	0.098
	356.74	Ⅰ	8	10	0.042
	374.41	Ⅰ	8	8	0.95
	375.18	Ⅰ	8	10	0.19
	379.85	Ⅰ	6	4	1.2
	380.77	Ⅰ	6	6	0.39
	388.31	Ⅰ	8	6	1.0
	388.74	Ⅰ	8	8	0.38
	391.65	Ⅰ	6	8	1.5
	394.93	Ⅰ	6	6	1.0
	402.26	Ⅰ	6	8	0.040
	404.45	Ⅰ	6	4	0.29
	409.42	Ⅰ	8	6	0.90
	410.58	Ⅰ	8	10	0.60
	413.83	Ⅰ	6	4	0.70
	415.86	Ⅰ	6	8	0.055
	418.76	Ⅰ	8	8	0.61
	420.37	Ⅰ	8	10	0.25
	422.27	Ⅰ	6	8	0.15
	427.17	Ⅰ	6	6	0.11
	435.99	Ⅰ	8	6	0.13
	438.64	Ⅰ	8	8	0.042
	439.44	Ⅰ	6	4	0.11
	464.31	Ⅰ	6	6	0.034
	468.19	Ⅰ	6	8	0.039
	469.11	Ⅰ	6	6	0.039
	530.71	Ⅰ	8	10	0.023
	565.83	Ⅰ	6	8	0.010
	567.58	Ⅰ	8	10	0.013
	576.02	Ⅰ	6	6	0.013
U	355.30	Ⅰ	13	13	0.020
	355.30	Ⅰ	9	7	0.014
	355.34	Ⅰ	15	13	0.022
	355.45	Ⅰ	11	9	0.0084
	355.49	Ⅰ	15	17	0.0079
	355.53	Ⅰ	13	15	0.027
	355.58	Ⅰ	13	11	0.0041
	355.69	Ⅰ	13	11	0.0075
	355.78	Ⅰ	13	13	0.029
	355.80	Ⅰ	11	13	0.016
	355.86	Ⅰ	9	7	0.039
	355.94	Ⅰ	7	9	0.015
	356.03	Ⅰ	9	7	0.064
	356.14	Ⅰ	15	13	0.055
	356.15	Ⅰ	9	9	0.025
	356.18	Ⅰ	13	11	0.057
	356.37	Ⅰ	13	13	0.029
	356.38	Ⅰ	7	7	0.011
	356.50	Ⅰ	13	11	0.029
	356.60	Ⅰ	13	15	0.017
	356.66	Ⅰ	11	11	0.24

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
U	356.88	I	13	13	0.038
	356.91	I	17	15	0.11
	356.94	I	9	9	0.015
	357.01	I	13	11	0.013
	357.02	I	11	9	0.0053
	357.06	I	13	15	0.027
	357.07	I	15	15	0.012
	357.12	I	11	11	0.0063
	357.16	I	17	15	0.13
	357.29	I	13	15	0.015
	357.39	I	13	11	0.040
	357.41	I	13	15	0.035
	357.48	I	13	15	0.019
	357.71	I	17	15	0.043
	357.75	I	15	13	0.0078
	357.78	I	11	11	0.0083
	357.79	I	13	13	0.023
	357.83	I	13	11	0.020
	358.00	I	9	9	0.012
	358.02	I	11	9	0.029
	358.04	I	11	13	0.0075
	358.09	I	13	13	0.021
	358.26	I	13	13	0.029
	358.46	I	7	5	0.024
	358.49	I	13	15	0.18
	358.54	I	11	11	0.019
	358.58	I	11	9	0.028
	358.78	I	9	11	0.013
	358.83	I	7	9	0.018
	358.97	I	11	13	0.021
	358.98	I	15	13	0.059
	359.07	I	9	7	0.022
	359.17	I	11	9	0.053
	359.30	I	11	11	0.014
	359.32	I	13	15	0.042
	359.37	I	11	11	0.072
V	304.312	I	6	8	0.23
	305.039	I	10	8	0.53
	305.365	I	4	4	1.3
	305.633	I	6	6	1.3
	306.046	I	8	8	1.4
	306.637	I	10	10	2.1
	306.653	I	6	4	0.32
	307.593	I	4	6	0.28
	308.033	I	2	4	0.27
	308.354	I	6	8	0.25
	308.706	I	2	2	0.92
	308.811	I	4	6	0.49
	308.913	I	4	4	0.53
	309.379	I	6	6	0.41
	309.469	I	2	4	0.43
	311.292	I	4	2	0.50
	318.341	I	6	8	2.4
	318.396	I	8	10	2.5
	318.398	I	4	6	2.4
	318.538	I	10	12	2.7
	319.801	I	6	6	0.39
	320.239	I	8	8	0.40
	320.558	I	8	10	1.3
V	320.741	I	10	10	0.26
	321.243	I	10	12	1.4
	321.887	I	8	6	0.35
	323.319	I	10	8	0.32
	327.303	I	8	8	0.27
	328.436	I	10	10	0.28
	330.918	I	4	4	0.32
	332.985	I	6	4	0.77
	335.635	I	4	6	0.31
	336.555	I	2	4	0.48
	337.605	I	4	4	0.32
	337.739	I	4	2	0.90
	337.762	I	6	6	0.60
	339.758	I	6	4	0.23
	340.039	I	8	8	0.25
	352.973	I	4	6	0.41
	353.368	I	6	8	0.52
	353.376	I	2	4	0.37
	354.349	I	2	2	0.67
	354.533	I	4	4	0.37
	355.327	I	6	6	0.22
	355.514	I	4	2	0.26
	366.360	I	4	6	3.1
	366.774	I	6	8	2.7
	367.241	I	12	12	0.92
	367.341	I	8	10	2.7
	367.670	I	14	14	1.3
	368.012	I	10	12	2.2
	368.626	I	10	12	0.23
	368.750	I	12	14	2.9
	368.807	I	8	8	0.35
	369.028	I	2	4	0.45
	369.222	I	6	6	0.54
	369.534	I	14	16	2.8
	369.586	I	4	4	0.66
	370.357	I	10	8	0.92
	370.470	I	8	6	0.66
	370.504	I	6	4	0.36
	370.603	I	10	10	0.52
	370.871	I	12	12	0.44
	379.046	I	10	8	0.23
	379.496	I	10	10	0.23
	380.679	I	10	10	0.25
	381.824	I	4	2	0.673
	382.856	I	6	4	0.533
	384.075	I	8	6	0.548
	385.536	I	4	4	0.330
	385.585	I	10	8	0.578
	386.386	I	8	6	0.31
	386.486	I	6	6	0.270
	387.107	I	10	8	0.28
	387.507	I	8	8	0.236
	390.226	I	10	10	0.268
	392.186	I	4	2	0.27
	392.243	I	6	6	0.26
	393.002	I	10	10	0.33
	393.401	I	8	8	0.62
	399.280	I	12	10	1.2
	399.873	I	14	12	1.0

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
V	405.096	I	10	10	1.4
	405.135	I	12	12	1.3
	409.057	I	8	10	0.85
	409.268	I	8	10	0.230
	409.548	I	6	8	0.72
	409.978	I	6	8	0.410
	410.215	I	4	6	0.71
	410.477	I	10	8	2.1
	410.516	I	4	6	0.49
	410.978	I	2	4	0.500
	411.178	I	10	10	1.01
	411.518	I	8	8	0.580
	411.647	I	6	6	0.32
	411.659	I	2	2	0.290
	412.350	I	4	2	1.00
	412.806	I	6	4	0.770
	413.199	I	8	6	0.55
	413.449	I	10	8	0.290
	423.246	I	10	10	0.98
	423.295	I	8	8	0.77
	426.864	I	14	14	1.2
	427.155	I	12	12	0.96
	427.695	I	10	10	0.94
	428.405	I	8	8	1.2
	429.182	I	12	14	0.88
	429.610	I	10	12	0.77
	429.767	I	8	10	0.70
	429.803	I	6	8	0.78
	437.923	I	10	12	1.1
	438.471	I	8	10	1.1
	438.998	I	6	8	0.69
	439.522	I	4	6	0.55
	440.057	I	2	4	0.34
	440.664	I	10	10	0.22
	440.763	I	8	8	0.44
	440.820	I	6	6	0.60
	441.647	I	4	2	0.26
	445.201	I	14	16	0.92
	445.775	I	10	12	0.27
	446.033	I	10	8	0.30
	446.236	I	12	14	0.76
	446.800	I	8	10	0.23
	446.971	I	10	12	0.62
	447.404	I	10	8	0.47
	449.606	I	8	6	0.40
	451.416	I	6	4	0.33
	452.421	I	12	10	0.30
	452.517	I	4	2	0.41
	452.958	I	10	8	0.24
	454.540	I	10	12	0.76
	456.072	I	8	10	0.70
	457.179	I	6	8	0.60
	457.873	I	4	6	0.68
	470.616	I	6	4	0.24
	475.747	I	4	2	0.76
	476.662	I	6	4	0.56
	477.636	I	8	6	0.51
	478.650	I	10	8	0.47
	479.692	I	12	10	0.48
V	480.752	I	14	12	0.58
	519.300	I	12	12	0.40
	519.539	I	8	8	0.23
	523.408	I	10	10	0.49
	524.087	I	12	12	0.43
	541.525	I	12	14	0.31
	548.791	I	12	10	0.29
	550.775	I	10	8	0.35
	609.021	I	8	6	0.260
	252.790	II	13	13	0.61
	252.847	II	9	9	0.52
	252.883	II	11	11	0.53
	255.404	II	9	9	0.54
	258.910	II	9	9	0.77
	264.086	II	5	7	1.2
	267.780	II	3	5	0.34
	267.933	II	7	7	0.34
	268.309	II	1	3	0.34
	268.796	II	9	9	0.76
	268.988	II	3	1	0.92
	269.025	II	7	5	0.34
	269.079	II	5	3	0.52
	270.094	II	9	11	0.35
	270.617	II	7	9	0.34
	273.422	II	9	7	0.62
	275.341	II	13	11	0.42
	278.420	II	9	9	1.3
	278.791	II	7	9	0.50
	282.586	II	9	7	1.2
	284.382	II	7	5	0.99
	284.757	II	9	7	0.46
	285.434	II	11	9	0.50
	286.231	II	11	11	0.36
	286.811	II	5	3	2.1
	286.913	II	13	11	0.48
	288.249	II	5	5	0.42
	288.478	II	3	3	0.56
	288.961	II	3	1	1.9
	289.164	II	5	3	1.4
	289.243	II	9	9	0.36
	289.265	II	7	5	1.3
	289.331	II	9	7	1.2
	290.307	II	3	5	0.34
	290.645	II	7	7	0.78
	290.881	II	11	9	1.6
	291.001	II	5	5	1.1
	291.038	II	3	3	1.2
	291.105	II	7	9	0.37
	291.246	II	11	9	0.50
	291.588	II	9	7	0.49
	292.402	II	11	11	1.7
	292.463	II	9	9	1.2
	293.080	II	7	7	0.58
	294.137	II	11	9	0.35
	294.457	II	9	7	0.76
	294.808	II	9	11	0.40
	295.207	II	7	5	0.72
	295.558	II	7	9	0.33
	296.837	II	7	9	0.70

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	统计权重 g_j	跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
V	297.226	Ⅱ	5	7	0.52
	297.398	Ⅱ	9	11	0.35
	298.518	Ⅱ	7	9	0.44
	300.120	Ⅱ	7	7	0.75
	301.482	Ⅱ	5	3	0.89
	301.678	Ⅱ	7	5	0.50
	302.021	Ⅱ	9	7	0.50
	304.821	Ⅱ	11	13	0.70
	306.325	Ⅱ	9	11	1.0
	310.094	Ⅱ	7	7	0.58
	311.356	Ⅱ	11	11	0.50
	312.289	Ⅱ	11	13	0.76
	313.493	Ⅱ	13	13	0.59
	313.650	Ⅱ	11	11	0.53
	313.973	Ⅱ	9	9	0.52
	315.132	Ⅱ	3	5	0.44
	319.069	Ⅱ	9	9	0.33
	325.078	Ⅱ	11	9	0.52
	325.187	Ⅱ	5	7	0.35
	327.112	Ⅱ	7	9	0.69
	327.612	Ⅱ	9	11	0.52
	327.984	Ⅱ	9	11	0.58
	328.771	Ⅱ	5	7	0.75
	333.785	Ⅱ	5	7	0.53
	351.730	Ⅱ	9	7	0.38
	353.077	Ⅱ	5	3	0.45
	354.519	Ⅱ	7	5	0.43
	355.680	Ⅱ	9	7	0.51
	359.201	Ⅱ	7	5	0.44
	361.892	Ⅱ	3	5	0.33
	231.806	Ⅲ	8	10	4.6
	232.382	Ⅲ	6	8	3.8
	233.042	Ⅲ	10	10	3.2
	233.175	Ⅲ	8	8	2.5
	233.421	Ⅲ	6	6	2.2
	233.713	Ⅲ	4	4	2.7
	234.310	Ⅲ	6	8	3.6
	235.873	Ⅲ	6	8	4.2
	236.631	Ⅲ	8	10	4.2
	237.106	Ⅲ	10	12	5.2
	237.306	Ⅲ	4	6	2.9
	238.246	Ⅲ	8	10	5.0
	239.358	Ⅲ	6	8	4.3
	240.418	Ⅲ	4	6	2.5
	251.614	Ⅲ	10	10	3.7
	252.155	Ⅲ	8	8	3.5
	254.821	Ⅲ	6	4	2.0
	255.422	Ⅲ	8	6	1.2
	259.305	Ⅲ	6	6	2.8
	259.510	Ⅲ	8	8	2.8
	107.105	Ⅳ	5	5	6.1
	111.220	Ⅳ	7	7	6.3
	112.784	Ⅳ	7	5	8.9
	113.126	Ⅳ	9	7	9.4
	124.372	Ⅳ	3	1	9.4
	130.542	Ⅳ	5	7	7.0
	130.806	Ⅳ	7	9	7.9
	130.950	Ⅳ	5	5	8.7
	131.272	Ⅳ	7	7	8.6
	131.757	Ⅳ	5	7	8.7
	132.192	Ⅳ	7	9	9.9
	133.036	Ⅳ	1	3	6.0
	133.246	Ⅳ	5	3	7.5
	133.449	Ⅳ	9	9	8.3
	140.042	Ⅳ	5	7	7.5
	140.362	Ⅳ	7	9	8.4
	142.372	Ⅳ	3	5	7.1
	145.104	Ⅳ	3	3	7.0
	152.014	Ⅳ	5	7	7.2
	180.618	Ⅳ	5	3	7.3
	180.985	Ⅳ	3	1	7.2
	186.156	Ⅳ	5	7	6.6
	193.907	Ⅳ	7	9	5.8
	212.005	Ⅳ	7	9	8.1
	214.120	Ⅳ	3	5	7.0
	214.683	Ⅳ	7	9	6.6
	215.109	Ⅳ	7	9	4.3
	244.680	Ⅳ	9	11	5.3
	257.072	Ⅳ	9	11	7.6
	328.456	Ⅳ	7	9	5.3
	349.642	Ⅳ	7	9	4.4
	351.425	Ⅳ	9	11	4.7
Xe	104.38	Ⅰ	1	3	0.59
	104.71	Ⅰ	1	3	1.3
	105.01	Ⅰ	1	3	0.085
	105.61	Ⅰ	1	3	2.45
	106.12	Ⅰ	1	3	0.19
	106.82	Ⅰ	1	3	3.99
	108.54	Ⅰ	1	3	0.410
	109.97	Ⅰ	1	3	0.434
	111.07	Ⅰ	1	3	1.5
	112.93	Ⅰ	1	3	0.044
	117.04	Ⅰ	1	3	1.6
	119.20	Ⅰ	1	3	6.2
	125.02	Ⅰ	1	3	0.14
	129.56	Ⅰ	1	3	2.5
	146.96	Ⅰ	1	3	2.8
	450.10	Ⅰ	5	3	0.0062
	452.47	Ⅰ	5	5	0.0021
	462.43	Ⅰ	5	5	0.0072
	467.12	Ⅰ	5	7	0.010
	480.70	Ⅰ	3	1	0.024
	711.96	Ⅰ	7	9	0.066
	796.73	Ⅰ	1	3	0.0030
	840.92	Ⅰ	5	3	0.010
	418.01	Ⅱ	4	4	2.2
	433.05	Ⅱ	6	8	1.4
	441.48	Ⅱ	6	6	1.0
	460.30	Ⅱ	4	4	0.82
	484.43	Ⅱ	6	8	1.1
	487.65	Ⅱ	6	8	0.63
	526.04	Ⅱ	2	4	0.22
	526.20	Ⅱ	4	4	0.85
	529.22	Ⅱ	6	6	0.89
	537.24	Ⅱ	4	2	0.71
	541.92	Ⅱ	4	6	0.62
	543.90	Ⅱ	4	2	0.74
	547.26	Ⅱ	8	8	0.099

续表

元素	谱线波长① λ/nm		统计权重 g_i	g_j	跃迁几率 $A/10^8 s^{-1}$
Xe	553.11	I	8	6	0.088
	571.96	I	4	6	0.061
	597.65	I	4	4	0.28
	603.62	I	6	6	0.075
	605.12	I	8	6	0.17
	609.76	II	6	4	0.26
	627.08	I	4	6	0.18
	627.75	I	4	6	0.036
	680.57	I	8	6	0.061
	699.09	I	10	8	0.27
Y	294.841	I	4	4	0.35
	297.459	I	4	6	0.35
	298.425	I	6	8	0.48
	299.526	I	6	4	0.051
	299.694	I	4	6	0.084
	300.526	I	4	4	0.048
	302.228	I	6	6	0.066
	304.536	I	6	6	0.107
	305.395	I	6	4	0.0019
	315.565	I	4	6	0.0027
	317.284	I	4	4	0.0099
	318.596	I	6	8	0.0012
	320.938	I	6	6	0.0030
	322.716	I	6	4	0.00110
	348.405	I	4	6	0.012
	354.966	I	6	6	0.0010
	355.269	I	4	4	0.23
	407.736	I	4	6	1.1
	408.371	I	4	4	0.25
	410.236	I	6	8	1.3
	412.830	I	6	6	1.6
	414.284	I	4	4	1.6
	416.751	I	6	6	0.238
	423.593	I	6	4	0.30
	435.240	I	4	4	0.0067
	437.933	I	6	4	0.783
	438.547	I	4	4	0.069
	439.401	I	8	8	0.019
	440.970	I	4	6	0.0027
	441.743	I	10	8	0.032
	443.734	I	6	6	0.0864
	444.365	I	10	8	0.11
	445.901	I	4	6	0.018
	447.695	I	8	6	0.28
	449.174	I	10	10	0.023
	451.401	I	4	6	0.334
	452.778	I	8	6	0.833
	453.409	I	6	8	0.044
	454.431	I	6	6	0.410
	455.936	I	2	4	0.40
	458.133	I	6	4	0.15
	461.300	I	6	4	0.18
	464.370	I	4	6	0.18
	465.378	I	4	6	0.16
	467.485	I	6	8	0.13
	472.584	I	4	4	0.15
	476.296	I	6	4	0.042
	478.016	I	2	4	0.089
	478.103	I	8	10	0.10
Y	479.930	I	6	8	0.16
	480.431	I	6	4	0.26
	480.480	I	4	4	0.384
	482.163	I	6	6	0.10
	484.567	I	8	8	0.68
	485.268	I	6	6	0.62
	485.671	I	6	6	0.20
	485.984	I	4	4	0.726
	489.344	I	6	4	0.22
	490.008	I	8	6	0.20
	490.611	I	10	8	0.12
	495.001	I	8	6	0.020
	496.349	I	4	4	0.014
	498.197	I	4	6	0.0047
	500.444	I	6	4	0.012
	520.501	I	4	4	0.0084
	525.847	I	6	6	0.0029
	527.182	I	8	6	0.011
	538.063	I	6	4	0.32
	538.124	I	4	4	0.0099
	538.839	I	6	8	0.011
	539.081	I	8	6	0.029
	540.188	I	6	8	0.0060
	542.436	I	6	4	0.347
	546.624	I	4	4	0.10
	546.647	I	10	12	0.63
	546.910	I	4	6	0.0036
	551.365	I	6	6	0.239
	551.988	I	4	6	0.012
	552.643	I	6	4	0.0039
	552.756	I	8	10	0.54
	554.163	I	8	8	0.052
	555.100	I	4	4	0.069
	557.303	I	6	4	0.018
	559.412	I	6	8	0.050
	560.634	I	10	10	0.0584
	561.996	I	6	4	0.020
	563.014	I	4	6	0.49
	564.178	I	2	4	0.019
	567.527	I	6	6	0.093
	567.564	I	4	6	0.043
	569.363	I	4	4	0.11
	571.494	I	8	6	0.020
	572.925	I	6	6	0.0022
	573.209	I	6	6	0.075
	574.022	I	8	6	0.040
	575.759	I	4	6	0.0076
	578.836	I	4	4	0.0094
	584.413	I	6	4	0.0056
	587.993	I	4	2	0.085
	590.291	I	6	8	0.040
	608.794	I	6	4	0.11
	619.172	I	4	4	0.047
	622.258	I	4	6	0.0059
	640.201	I	6	4	0.0027
	643.502	I	6	6	0.040
	643.717	I	10	8	0.048
	653.857	I	10	10	0.15
	662.248	I	8	6	0.0045

续表

元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$	元素	谱线波长[①] λ/nm		统计权重		跃迁几率 $A/10^8s^{-1}$
			g_i	g_j					g_i	g_j	
Y	681.515	Ⅰ	2	4	0.0718	Y	485.487	Ⅱ	5	3	0.39
	700.989	Ⅰ	2	4	0.044		488.144	Ⅱ	5	3	0.0015
	703.515	Ⅰ	4	4	0.063		488.369	Ⅱ	9	7	0.47
	311.203	Ⅱ	1	3	0.013		490.011	Ⅱ	7	5	0.451
	317.942	Ⅱ	3	5	0.038		498.213	Ⅱ	7	9	0.015
	319.562	Ⅱ	3	3	0.823		508.742	Ⅱ	9	9	0.20
	320.027	Ⅱ	5	5	0.48		511.911	Ⅱ	5	7	0.016
	320.332	Ⅱ	3	1	2.77		520.041	Ⅱ	5	5	0.13
	321.669	Ⅱ	5	3	2.0		520.573	Ⅱ	7	7	0.16
	324.228	Ⅱ	7	5	2.0		528.982	Ⅱ	7	5	0.0067
	344.881	Ⅱ	5	5	0.041		532.078	Ⅱ	9	7	0.0039
	346.788	Ⅱ	5	3	0.027		547.339	Ⅱ	3	5	0.043
	349.608	Ⅱ	1	3	0.349		548.073	Ⅱ	1	3	0.0762
	354.901	Ⅱ	5	7	0.397		549.741	Ⅱ	5	5	0.12
	358.451	Ⅱ	3	5	0.402		550.990	Ⅱ	5	5	0.0424
	360.074	Ⅱ	7	7	1.4		554.461	Ⅱ	3	1	0.18
	360.191	Ⅱ	3	3	1.13		554.601	Ⅱ	5	3	0.058
	361.104	Ⅱ	5	5	1.04		572.889	Ⅱ	5	5	0.030
	362.870	Ⅱ	5	3	0.33		661.374	Ⅱ	5	7	0.017
	366.462	Ⅱ	7	5	0.37		683.248	Ⅱ	5	5	0.0033
	371.029	Ⅱ	7	9	1.5		726.416	Ⅱ	5	3	0.013
	374.755	Ⅱ	3	3	0.19	Yb	246.45	Ⅰ	1	3	0.91
	377.434	Ⅱ	5	7	1.1		267.20	Ⅰ	1	3	0.118
	377.656	Ⅱ	5	3	0.242		346.44	Ⅰ	1	3	0.62
	378.870	Ⅱ	3	5	0.81		398.80	Ⅰ	1	3	1.76
	381.834	Ⅱ	5	5	0.0970		555.65	Ⅰ	1	3	0.0114
	383.290	Ⅱ	7	7	0.30		328.94	Ⅱ	2	4	1.8
	387.829	Ⅱ	7	5	0.029		369.42	Ⅱ	2	2	1.4
	393.066	Ⅱ	5	5	0.021	Zn	110.91	Ⅰ	1	3	0.305
	395.036	Ⅱ	3	5	0.280		213.86	Ⅰ	1	3	7.09
	395.159	Ⅱ	5	3	0.015		307.59	Ⅰ	1	3	0.000329
	398.260	Ⅱ	5	5	0.27		328.23	Ⅰ	1	3	0.90
	412.491	Ⅱ	5	7	0.018		330.26	Ⅰ	3	5	1.2
	417.754	Ⅱ	5	5	0.527		330.29	Ⅰ	3	3	0.67
	419.927	Ⅱ	3	5	0.00536		334.50	Ⅰ	5	7	1.7
	420.469	Ⅱ	1	3	0.0220		334.56	Ⅰ	5	5	0.40
	423.573	Ⅱ	5	5	0.023		334.59	Ⅰ	5	3	0.045
	430.962	Ⅱ	7	5	0.129		636.23	Ⅰ	3	5	0.474
	435.873	Ⅱ	3	3	0.0555		1105.4	Ⅰ	3	1	0.243
	437.495	Ⅱ	5	5	0.997		202.55	Ⅱ	2	4	3.3
	439.801	Ⅱ	5	3	0.116		206.42	Ⅱ	2	4	4.6
	442.259	Ⅱ	3	1	0.183		209.99	Ⅱ	4	6	5.6
	468.233	Ⅱ	5	5	0.019		210.22	Ⅱ	4	4	0.93
	478.658	Ⅱ	7	7	0.021		491.16	Ⅱ	4	6	1.6
	482.331	Ⅱ	5	5	0.043						

① 表中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ……依次为中性原子谱线、一次电离的离子谱线、二次电离的离子谱线……。

第三节　发射光谱定性、半定量及定量分析

一、光谱定性分析

光谱定性分析的任务主要是判断试样中含有哪些元素或有无某些指定的元素，并粗略地估计这些元素的大致含量。

定性分析采用摄谱法或看谱法较为方便，它主要是根据样品中光谱线出现的情况来确定元素的存在，因而正确辨认元素谱线，是发射光谱定性分析的关键。

1. 元素的灵敏线、最后线及分析线

元素的灵敏线一般是指强度较大的一些谱线，通常具有较低的激发能和较大的跃迁几率。元素的灵敏线多是一些共振线，而激发能最低的共振线通常是理论上的最灵敏线。

最后线是当样品中某元素含量逐渐减小时，最后仍能观察到的谱线。

在进行光谱定性分析时，并不需要找出元素的所有谱线，一般只需找出一根或几根灵敏线即可，所用的灵敏线，即称为分析线。

表 2-5 是按元素符号排列的元素灵敏线及其强度，表 2-6 是按波长排列的元素灵敏线及其强度，表 2-7 是（200～180）nm 真空紫外区的元素光谱线波长，表 2-8 是铁谱的标准波长。

2. 光谱比较法

光谱比较法是将试样光谱与标样光谱进行比较从而确定试样中元素是否存在的方法，常用的有标样光谱比较法和光谱图片比较法。

（1）标样光谱比较法　把标样光谱与试样光谱摄在感光板上，直接进行比较。

（2）光谱图片比较法　把标样光谱预先制成光谱图片，试样光谱摄在感光板上，然后在光谱投影仪上观察，把谱片的光谱放大像与图片的光谱图像进行比较，以确定试样中元素存在与否。观察时要通过铁光谱确定分析线的位置，间接地进行比较。

3. 波长测定法

波长测定法是依据未知谱线处于两条已知波长的铁谱线中间，这些谱线的波长很接近，谱片上的谱线间的距离与谱线间的波长差可看作成正比，因而谱线的波长可由线间距的准确测量来确定，再根据波长的数值由谱线表中查出该谱线所属元素。

表 2-5　按元素符号排列的元素灵敏线及其强度[①][1]

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	(B)	
Ac 锕	418.312 I	3.0	500	20						
	417.998 I	3.0	1000	50						
	408.844 II	10.8	2000	3000						
	262.644 III	23.7	20	5000						
Ag 银	546.549 I	6.04	1000 R	500 R		18.0				
	520.907 I	6.04	1500 R	1000 R		11.0	0.01			Cr(0.03)
	405.546 I	6.72	800 R	500 R						
	338.289 I	3.66	1000 R	700 R	28000	2200.0	0.0001	13	2	Sb(1),Cr(0.5),Ti
	328.068 I	3.78	2000 R	1000 R	55000	4200.0	0.0001	7	1	Fe,Mn,V
	243.779 II	17.5	60	500 wh	90	23.0	1	120	25	Cu(0.1),Mn(0.3),Fe,Ni
	224.641 II	17.9	25	300		11.0		130		
Al 铝	624.336 II	21.0		80						
	396.153 I	3.14	3000	2000	9000	2050.0	0.001	28	1	Mo,Ca,Ti,V,Zr,Ce
	394.403 I	3.14	2000	1000	4500	1050.0	0.001	47	2	Ar,Mo,Ce
	309.271 I	4.02	1000 R	1000 R	6500	1400.0	0.003	23	1	Fe,Mo,Mg,V
	308.216 I	4.02	800 R	800 R	3200	780.0	0.003	45	2	V,Mn,Mo,OH,Ce
	266.039 I	4.66	150 R	60		55.0	0.01			Fe
	265.250 I	4.66	150 R	60		27.0	0.01			
	237.335 I	5.22	200 R	100 R	170		0.1	30		Cr,Fe,Mn
	236.706 I	5.22	150 R	50 R		75.0		51		
Am 镅	351.013 I	3.53	5000							
	296.929 II	10.5	1000							
	282.226 II	10.4	5000							
Ar 氩	811.531 I	13.1		[5000]		4300				
	750.387 I	13.5		[700]		1500				
	706.722 I	13.3		[400]		2200				
	696.543 I	13.3		[400]		2400				
	675.283 I	14.74		[200]		170.0				

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	
Ar 氩	603.213 I	15.13		[60]		160.0				
	549.588 I	15.33		[1000]		110.0				
	451.073 I	14.57		[1000]		120.0				
	420.067 I	14.50		[1200]		750.0				
	415.859 I	14.53		[1200]		800.0				
	404.442 I	14.68		[1200]		230.0				
	394.898 I	14.68		[2000]		170.0				
	355.431 I	15.04		[300]		100.0				
	331.934 I	15.28		[300]		20.0				
	317.296 I	15.45		[150]		8.0				
As 砷	289.871 I	6.56	25 R	40			0.1			Fe
	286.044 I	6.56	50 R	50	900	8.5	0.003		300	
	278.022 I	6.74	75 R	75	1400	16.0	0.003	526	200	
	245.653 I	6.37	100 R	8		2.0	0.1			
	234.984 I	6.56	250 R	18	2600	30.0	0.003	142	75	Mo,Cu,W,V,Ti,Zr
	228.812 I	6.74	250 R	5	2600	36.0	0.003	83	60	Cd(0.01),Fe,N,Co,Ni
	197.262 I	6.29	500		65000	5.8		76		Al,V
	193.759 I	6.40	500		55000	6.5		53		Al,Fe,V
	189.042 I	6.56	500			1.7		136		
Au 金	312.278 I	5.10	500 h	5	1600	58.0	0.01		6	
	267.595 I	4.63	250 R	100	3400	620.0	0.001	31	2	Co,W(1),Cr,Fe,Mg,Mn,V
	242.795 I	5.10	400 R	100	2600	500.0	0.001	17		Sr,Pt(1),Fe,Mn
B 硼	249.773 I	4.96	500	400	4800	2200.0	0.003	4.8	0.4	Fe(3),Sn(0.1),W,Ta,Mn,Mo,Co
	249.678 I	4.96	300	300	2400	1150.0	0.003	5.7	0.8	F(3),W,Co
	208.959 I	5.94	155	20		140.0	0.05	10		Al,Fe,Mo,Ni,Cr
	208.893 I	5.94	100	15	4200	75.0	0.05	12		Al,Fe,Ni
	206.723 II	43.9		20		1.2	1.0			
	206.577 II	43.9		20			1.0			
Ba 钡	659.533 I	3.00	1000	300		4.0	0.01			
	649.690 II	7.70	800 R	300 Wh		4100.0	0.003			
	614.172 I	2.72	200 Wh	200 Wh		4300.0	0.003			
	553.548 I	2.24	1000 R	200 R		65.0	0.003			Mo,Fe
	493.409 II	7.70	400 h	400 h	20000	16000.0	0.001	2.3		Fe
	455.404 II	7.90	1000 R	200	65000	43000.0	0.0003	1.3	0.05	Cr,Ni,Ti
	307.158 I	4.04	100 R	50 R			0.1			Mo(0.5),Nb(0.3)
	233.527 II	11.2	60 R	100 R	2000	1150.0	0.03	4	0.04	V(1),Fe,Ni
Be 铍	457.267 I	7.98	15	15		65.0	1.0			
	332.134 I	6.45	1000 R	30	1100	800.0	0.001	21	1.2	
	332.109 I	6.45	100	15			0.001			
	313.107 II	13.2	200	150	3200	41000.0	0.0003	0.73	0.1	Ti(0.3),Nb
	313.042 II	13.2	200	200	4800	64000.0	0.0003	0.27	0.07	V(0.01),Nb,Ti
	265.078 I	7.40	25				0.001			Pb
	265.064 I	7.40	10				0.003			
	265.062 I	7.40	20	15			0.003			
	265.055 I	7.40	30				0.003			
	265.047 I	7.40	100	15	1400	900.0	0.003	4.7	0.6	Pb(3),Zr(0.1),Co(0.5)
	249.473 I	7.68	30	20	1000	800.0	0.003	3.8		Fe,Cr,Mg,Mn
	234.861 I	5.25	2000 R	50	9500	11500.0	0.0003	0.31	0.06	Ni(3),Cu,Fe,Ti
Bi 铋	472.255 I	4.04	1000	100			0.001			Zn
	306.772 I	4.04	3000 hR	2000 Wh	36000	380.0	0.0003	75	14	Fe,Mo,Sn(10),V,Zr,OH
	299.334 I	5.60	200 Wh	100 Wh		6.0	0.01			Mo(0.2)
	298.903 I	5.60	250 W	100 Wh	2800	22.0	0.01		150	
	293.830 I	6.1	300 W	300 W	3200	32.0	0.01		130	
	289.798 I	5.7	500 WR	500 WR	4000	38.0	0.01	333	100	Mn,Nb(0.1)
	280.962 I	6.3	200	100			0.1			
	278.052 I	5.9	200	100		3.5	0.1			
	227.658 I	5.5	100 R	40	340	6.8	0.01	250		

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度 电弧	强度 火花（放电管）	强度 经典光源	强度 ICP	检出限 碳电弧/%	检出限 ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	检出限 ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	干扰元素及浓度(w/%)
Bi 铋	206.170 I	6.0	300 R	100	14000	6.5	0.1	85		Al,Cr,Cu,Fe,Ti
	195.389 I				48000			214		
Br 溴	481.671 Ⅱ	26.1		[300]						
	478.550 Ⅱ	26.1		[400]						
	470.486 Ⅱ	26.2		[250]						
C 碳	426.726 Ⅱ	32.2		500			0.3			
	426.703 Ⅱ	32.2		350						
	283.760 Ⅱ	27.6		40						
	283.671 Ⅱ	27.6		200						
	247.857 I	7.65	400	[400]	100	4.5	0.1	176	40	Fe,Cr,Ti,V
	229.689 Ⅲ	53.7		200			0.1			
	199.362 I							8823		
	193.091 I					1.8		44		Al,Mn,Ti
Ca 钙	534.947 I	5.02	12	12		5.0	1.0			
	527.028 I	4.88	20	10		17.0	0.1			
	526.556 I	4.88	20	10		9.0				
	526.424 I	4.88	15	8		3.5				
	445.478 I	4.68	200	5		100.0	0.01			
	443.496 I	4.68	150	25		65.0	0.01			
	442.544 I	4.68	100	20		30.0	0.03			
	422.673 I	2.93	500 R	50 R	11000	2900.0	0.001	10	3	Fe,Cr
	396.847 Ⅱ	9.20	500 R	500 R	22000	230000	0.001	0.50	0.03	Fe,Ar,V,H
	393.367 Ⅱ	9.30	600 R	600 R	42000	450000	0.001	0.19	0.04	V
	317.933 Ⅱ	13.2	100	400 W	500	1600.0	0.01	10	3	Fe,Mo,Cr,OH,W
	315.887 Ⅱ	13.2	100	300 W	200	950.0	0.03		7	Fe,Mo,Co,Cr
	299.496 I	6.01	25	3		3.0	1.0			Cr(>0.3)
Cd 镉	643.847 I	7.34	2000	1000		7.0	0.03			
	479.992 I	6.39	300	300	1400	30.0	0.03	600	15	
	361.051 I	7.37	1000	500	3600	135.0	0.003	230	4	Fe,Mn,Ni,Ti
	346.620 I	7.37	1000	500	2500	77.0	0.003	428	5	
	340.365 I	7.37	800	500 h	800	35.0	0.003		15	Nb(3),Cr(0.1),V(0.3),Ni,Zr(1),Ti(2)
	326.106 I	3.80	300	300	320	95.0	0.003	333		Co(0.3),Ti(0.02),V(0.3),Fe
	274.858 Ⅱ	19.30	5	200		5.0	1.0			
	257.293 Ⅱ	19.30	3	150		2.0	1.0			
	231.277 Ⅱ	20.1	1	200	190	4.2	1.0	600		
	228.802 I	5.41	1500 R	300 R	15000	1400	0.001	2.7	≈0.4	As(0.01),Ar,Al,Fe,Ni
	226.502 Ⅱ	5.47	25 d	300	9000	1000		3.4	≈0.8	Fe,Ni
Ce 铈	441.878 Ⅱ	10.3	40	10		500.0	0.03			
	418.660 Ⅱ	10.4	80	25	3500	1400	0.03	52	2	CN,Fe,Ti,Zr
	413.765 Ⅱ	10.1	25	12	2000		0.03	48		Ca,Fe,Ti
	404.076 Ⅱ	10.1	70	5	2100	900.0	0.03	75		
	401.239 Ⅱ	10.2	60	20	2700	850.0	0.03	75	2	CN,Ti,Cr
	399.924 Ⅱ	10.0	80	20	2800	850.0	0.03		1.5	CN,Ti,Cr
	389.827 Ⅱ	10.2	80	6		200.0				
	357.746 Ⅱ	10.5	300	12		500.0				
	356.080 Ⅱ	10.8	300	2		550.0				
	353.909 Ⅱ	10.4	100	10		240.0				
	322.117 Ⅱ	11.0	50	8			0.3			W(0.1),Ti(0.5)
	320.171 Ⅱ	11.3	50	10		300.0	0.1			Ti(3),Sm(0.3),Mo
Cl 氯	489.677 Ⅱ	31.2		[200]						
	481.946 Ⅱ	28.9		[200]						
	481.006 Ⅱ	28.9		[200]						
	479.454 Ⅱ	28.9		[200]						
	413.248 Ⅱ	32.0		[200]						
	383.340 Ⅱ	34.5		[200]						
Co 钴	412.132 I	4.03	1000 R	25		85.0	0.01			
	411.877 I	4.1	1000 R			45.0	0.01			

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	
Co 钴	399.531 I	4.23	1000 R	20		100.0	0.01			
	352.981 I	4.0	1000 R	30		190.0	0.01			
	350.228 I	4.18	2000 R	20		290.0	0.003			
	347.402 I	4.15	3000 R	100		160.0	0.001			
	346.580 I	3.6	2000 R	25		130.0	0.003			
	345.351 I	4.02	3000 R	200	21000	530.0	0.001		0.4	Ni(0.03),Cr(1),La
	341.234 I	4.15	1000 R	100		200.0	0.01			
	340.512 I	4.07	2000 R	150		350.0	0.1			Zr,Ce
	251.982 II	14.1	40	200		90.0	0.1			
	237.862 II	13.5	25	50 W	2100	500.0	0.1	9.7	2	Al,Fe
	236.379 II	13.6	25	50	1900	400.0	0.1	11	2	
	230.786 II	15.5	25	50 W	2900	400.0	0.1	9.7	1	
	228.616 II	13.7	40	300	4100	570.0	0.1	7	≈0.07	Cr,Fe,Ni,Ti,Mo
Cr 铬	520.844 I	3.32	500 R	100		210.0	0.01			
	520.604 I	3.32	500 R	200		150.0	0.01			
	520.452 I	3.32	400 R	100		90.0	0.01			
	428.972 I	2.89	3000 R	800 r	10000	480.0	0.001		6	Ca
	427.480 I	2.90	4000 R	800 r	16000	750.0	0.001		3	Cu(1),Ti(1),Nb(3),Zr(5)
	425.433 I	2.91	5000 R	1000 R	20000	1000.0	0.001		3	Nb,Pr,Mo
	360.533 I	3.43	500 R	400 R	13000	1200.0	0.003		3	
	359.349 I	3.44	500 R	400 R	17000	1600.0	0.003		2	
	357.869 I	3.46	500 R	400 R	19000	2000.0	0.003	23	2	
	286.093 II	12.6	60	100		450.0	0.01			
	285.568 II	12.6	60	200	880	1000.0	0.01	18		
	284.984 II	12.6	80	150 R	1200	1700.0	0.01	14	2.5	Fe(10),Zr
	284.325 II	12.6	125	400 R	1700	2600.0	0.01	8.6	2	
	283.563 II	12.6	100	400 R	2500	3700.0	0.01	7.1		Fe,Mg,V
	273.191 I	5.5	300 r	30		15.0	0.1			V(0.1),Ti
	240.862 I	6.2	150 r	2 r		4.5	0.3			Co(0.3)
Cs 铯	894.350 I	1.4	2000 R		8000		0.001			
	852.110 I	1.5	5000 R		15000		0.001			
	459.318 I	2.70	1000 R	50 R	200		0.01		14	V(0.01),Fe,Ni
	455.536 I	2.72	2000 R	100	400	950.0	0.01	100	27	Ba(0.01),Fe,Ti(≈0.1)
Cu 铜	521.820 I	6.19	700			40.0	0.1			
	515.324 I	6.19	600			25.0	0.1			
	510.554 I	3.82	500			25.0	0.1			Co(0.3),Th(0.5),Ti(1),Fe(5),Ca,Ni,V
	327.396 I	3.78	3000 R	1500 R	25000	4000.0	0.0001	9.7	0.6	
	324.754 I	3.82	5000 R	2000 R	50000	8000.0	0.0001	5.4	0.3	Co,Mo(0.1),Nb,Cr(1),Fe(10),Ca,Ti,Ni
	296.117 I	5.57	350	300	240	21.0	0.03		50	
	282.437 I	5.78	1000	300	500	30.0	0.03		20	Ag(3)
	261.837 I	6.12	500 W	100	400	30.0	0.1		25	
	249.215 I	4.97	200 r	50		27.0	0.1			
	224.699 II	16.0	30	500	400	350	0.1	7.7		Fe,Ni,Ti
	219.226 II	16.2	25	500 h	360	100	0.1	17		
	213.598 II	16.2	25	500 W	2000	120	0.1	12		
Dy 镝	421.175 I	>2.9	200				0.01			CN
	416.799 I	>3.0	50				0.1			
	407.798 II	9.9	150 r	100	7400		0.1	40		
	404.599 I	>3.0	150	12			0.1			Ar,CN
	400.048 II	10.0	400	300	8000		0.1	35	0.9	
	394.468 II	3.14	300		22000			10	0.3	
	364.540 II	3.50	300		11000			23	0.6	Ca,Fe,Sc,V
	353.170 II	3.50	100		22000			10	0.3	
Er 铒	400.797 I		35				0.01			Ti(3)
	390.632 II	>3.2	25	12	11000		0.01	21	0.6	
	369.264 II	9.6	20	12	7900		0.01	18	0.8	

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度 电弧	强度 火花(放电管)	强度 经典光源	强度 ICP	检出限 碳电弧/%	检出限 ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	检出限 ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	干扰元素及浓度(w/%)
Er 铒	349.911 II	9.8	18	15	6700		0.01	17		Fe,Ti,V
	337.275 II	9.9	35	20	7700		0.01	10		Ti(0.001),Sc(0.01)
	291.036 II		20	6	1500		0.01	27		Zr(0.1),Ce(10),Gd(0.3)
	258.673						0.01			Zr(1)
Eu 铕	420.505 II	8.6	200 R	50	60000		0.001	4.3	0.08	CN,Cr,Cu,Fe,Mn,V
	412.974 II	8.7	100 R	50 R	33000		0.001	4.3	0.13	CN,Ca,Cr,Ti
	390.711 II	9.1	1000 RW	500 R	28000		0.03	7.7		
	381.966 II	8.9	500 Wd	500 Wd	39000		0.03	2.7	0.08	CN,Ca,Cr,Fe,Ti,V
	290.668 II	10.0	300 W	300	11000		0.01	21	0.6	
	282.077 II	10.1	200 W	200 W			0.03			
	281.395 II	10.1	300 W	300 Wh	3400		0.1	13		Y(10)
	272.778 II	10.2	300	500	4200		0.01	8.1		Ce(10),Fe
	263.876 II	10.6	300	200			0.1			
F 氟	739.87 I	14.4		[400]						
	720.24 I	14.7		[125]						
	712.80	14.8		[150]						
	690.246 I	14.5		[500]						
	685.602 I	14.5		[1000]						
	529.10	≤3.2	200				0.1			
	577.20									
	405.08									
Fe 铁	440.475 I	4.37	1000	700		550	0.01			
	438.355 I	4.31	1000	800		150	0.01			
	432.577 I	4.50	1000	700		72	0.01			
	430.791 I	4.40	1000 R	800 R		70	0.003			
	427.176 I	4.40	1000	700		35	0.01			
	406.360 I	4.60	400	300		100	0.03			
	404.582 I	4.60	400	300		190	0.03			
	374.826 I	3.40	500	200		90	0.03			
	374.590 I	3.43	150	100			0.03			
	374.556 I	3.39	500	500		210	0.01			
	373.487 I	4.18	1000 r	600	7000	560	0.003		4	
	371.994 I	3.33	1000 R	700		520	0.0005			
	358.120 I	4.32	1000 R	600 R		600	0.001			
	302.064 I	4.11	1000 R	600 R			0.001			Cr(0.3)
	297.324 I	4.22	500 R	400 R		140	0.003			
	271.903 I	4.54	500 r	300 r		480	0.001			
	259.957 I	5.68	1000				0.001			Mo(10)
	259.940 II	4.77	1000	1000	2000	7000		6.2	12	Mo(10),Mn,Ti,Nb
	259.837 II	12.7	700	1000h	650	2100	0.001	12		Mn(8)
	248.327 I	4.99	500 R	5		650				
	238.204 II	5.20	40 R	100 R	1300			4.6	0.7	Cr,V,Co
Ga 镓	417.206 I	3.07	2000 R	1000 R	20000	900	0.001	66	3	Fe,Cr,Ti
	403.298 I	3.07	1000 R	500 R	10000	500	0.001	111	5	Mn,Ca,Cr,Fe
	294.418 I	4.29	10	15 R	1500	60	0.001	319	20	Ni(0.1),Fe,V,W
	294.364 I	4.29	10	20 r	9500	650	0.001	46	3	Ni(0.1),Fe,V,W,Cr,Mn,Ti
	287.424 I	4.29	10	15 r	5000	360	0.001	78	5	Fe(0.1),Cr,Mg,Ti,V
	265.987 I	4.64	5	12	340	11	0.01	833		Al(1)
	250.017 I	5.04	12	10 r	120	15	0.003	187		
Gd 钆	376.839 II	9.6	20	20	8700		0.1	25	4	
	364.620 II	9.8	200 W	150	6100		0.01	30	6	
	335.863 II	9.9	100	100	4300		0.01	21		Ce
	303.406 II	10.3	100	60	1600		0.01	34		Sn(0.003),Cr(0.1),Th,V
	303.285 II	10.4	100	100	2100		0.01	27		Sn(0.1),As(0.3),Ce(3)
Ge 锗	422.657 I	4.96	200	50		14	0.1			Ca
	326.949 I	4.67	300	300		45	0.01			
	303.907 I	4.96	1000	1000	7500	350	0.001	103	9	In(0.01),Fe(3),Nb(0.5)
	275.459 I	4.65	30	20	6500	220	0.001	107	9	
	270.963 I	4.62	30	20	8500	190	0.001	111	7	Cr(0.3)

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度 电弧	强度 火花(放电管)	强度 经典光源	强度 ICP	检出限 碳电弧/%	检出限 ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	检出限 ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	干扰元素及浓度(w/%)
Ge 锗	269.134 I	4.65	25	15		120	0.001			Cr(0.1),V(0.5),Mn(5)
	265.158 I	4.65	30	20	5500	120	0.001	83	10	Fe,Pb(10)
	265.118 I	4.83	40	20	12000	500	0.0003	48	4	Pt,Cr,Fe,Mn,Ti,V
	259.254 I	4.83	20	15	5000	160	0.001	103		
H 氢	656.279 I	12.09		[3000]		1100				
	486.133 I	12.74		[500]		105				
	434.047 I	13.05		[200]		45				
	410.174 I	13.21		[100]		[illegible].5				
He 氦	587.597 I	23.1		[3000]						
	587.562 I	23.1		[1000]						
	468.575 II	75.6		[300]						
	388.865 I	23.0		[1000]						
Hf 铪	409.316 II	9.0	25	20		300				
	339.980 II	9.1	60	100	2300	1200	0.003		2.5	
	313.472 II	9.8	80	125		650	0.003			
	301.290 II	9.5	80	100		750	0.003			Cr,V,Os
	286.637 I	4.3	50	12		50	0.01			W,Fe
	277.336 II	10.8	25	60	980	950	0.01	15		Fe,Cr,Mg,Mn,Ni,V
	264.141 II	11.2	40	125	1100	750	0.01	18		Th(0.1),Ti,Fe,Cr,V
	263.871 II	10.2	40	100	1100	850	0.01	18		Mo(0.01),Zr,Cr,Fe,Mn,Ti
	234.744 II	11.6	80	125		70	0.01			Ba,Ni
Hg 汞	546.074 I	7.73		[2000]		5.5				
	435.835 I	7.73	3000 W	[500]		11	0.01			Cr,Cu,Fe,Ni
	404.656 I	7.73	200	300	1800	5.0			90	
	366.328 I	8.85	500	400		2.0				
	365.483 I	8.83		[200]	300	3.0		1000		
	365.015 I	8.86	200	500						
	313.183 I	8.85	200	100	320		1		300	
	313.155 I	8.82	400	300			1			
	312.566 I	8.85	200	150	400		1		250	
	296.728 I	8.84	100 W	100	1200	9.0		1764	70	
	253.652 I	4.88	2000 R	1000 R	15000	230	0.01	61	5	Co(0.1),Fe,Pt,Ta,Mn,Ti
	194.164 II					22				
Ho 钬	410.384 I		400	400			0.01			CN,Ce(3)
	404.543 I		200	80			0.01			CN,Ce(3)
	389.102 II	10.1	200	40	13000		0.01	10	0.5	CN,Ce(3),Ca,Cr,Er,Fe,Tm,V
	374.817 II	10.2	60	40			0.1			
	345.600 II		60	60	16000		0.1	5.7	0.3	Er,Y(1),Dy(0.1),Cr,Fe,Ti
	341.646		30	40	5400		0.1	18		Ce(1),Er(1)
	339.898 II		40	60	8100		0.1	13	0.7	Fe,Ce(10),Cr,Ti
	293.677	7.4		1000 R			0.01			
I 碘	567.808 II	24.3		[80]						
	546.462 II	22.7		[900]						
	540.736 II	24.3		[60]						
	533.819 II	24.3		[300]						
	516.120 II	22.9		[300]						
	498.692 II	24.3		[200]						
	206.238			[900]						
In 铟	451.131 I	3.02	5000 R	4000 R	18000	300	0.001	187	6	Ti,Sn,Ta,Ar,Fe,V
	410.177 I	3.02	2000 R	1000 R	17000	250	0.001	468	6	
	325.856 I	4.1	500 R	300 R	3000	45	0.003	600	20	Mn(0.1),Fe
	325.609 I	4.1	1500 R	600 R	13000	370	0.001	120	5	Mn(0.1),Fe,V
	303.936 I	4.1	1000 R	500 R	8000	240	0.003	150	6	Ge(0.003),Cr(0.1),Nb(0.3),Co(1),Fe,W
	293.262 I	4.47	500	300	1100	13	0.03	1500		V(0.5),Ta(10),Ni
	275.388 I	5.01	300 R	300 Wh	700	8	0.03	1875		
	271.027 I	4.81	800 R	200 Rh	1600	25	0.01	555	25	

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度 电弧	火花（放电管）	经典光源	ICP	检出限 碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	(B)	干扰元素及浓度(w/%)
Ir 铱	351.365 I	3.52	100	100		30	0.01			
	343.702 I	4.39	20	15		9	0.05			
	322.078 I	4.20	100	30	5100	65	0.01		20	Pb
	313.332 I	4.74	40	2		50	0.03			
	292.479 I	4.24	25	15	4400	55	0.03		15	
	284.973 I	4.35	40	20	3800	65	0.03	300		Cr,Co
	282.445 I	4.74	20	15		40	0.1			
	269.423 I	4.95	150	50	3000	45	0.01	272		
	266.479 I	4.65	200	50		50	0.01			
	263.971 I	4.70	100	15	3500	65	0.03	176		
	254.397 I	5.22	200	100	7900	55	0.01	157	9	
K 钾	769.898 I	1.61	5000 R	200	9000	10	0.001			Cr,Ti
	766.490 I	1.62	9000 R	400	18000	22	0.001			Ti
	404.720 I	3.06	400	200	160	0.9	0.03	42857	100	
	404.414 I	3.06	800	400	320		0.03		200	Ar,Ca,Cr,Fe,Ti
	344.770 I	3.60	100 R	75 R			1			Mo(0.03),Fe(3),Cr,Rh,Ne
	344.672 I	3.60	150 R	100 R			1			
	321.750 I	3.86	50 R	25			10			
	321.716 I	3.86	100 R	20			10			
Kr 氪	587.092 I	12.1		[3000]						
	557.029 I	12.1		[2000]						
	435.547 II	30.8		[3000]						
La 镧	624.993 I	2.49	300							
	593.068 I	2.09	100							
	545.515 I	2.40	200	1						
	433.373 II	8.6	800	500	4600		0.01		1	Zr(10)
	412.323 II	8.9	500	500	4400		0.01	10	1	
	408.671 II	8.6	500	500	5500		0.01	10	0.8	Ca,Cr,Fe
	399.575 II	8.9	600	300	3600		0.01	13		Zr(5),Pr
	398.852 II	9.1	1000	800	4400		0.01	11	0.8	
	394.911 II	9.1	1000	800	9000		0.01		0.4	Ar,Ti,Fe,Cd
	333.749 II	9.7	800	300	1500		0.01	10		Mg,Cu,Co(0.5),Fe
	261.034 II	11.3	10	150			0.1			Mn(0.3)
Li 锂	670.784 I	1.85	3000 R	200	36000	123000	0.0001		0.3	Mo,Co,V,Ti
	610.364 I	3.87	2000 R	300	3200	420	0.0003		4.0	Ca,Fe,Mo,Co
	460.286 I	4.54	800		130	52	0.03	8.57	0.50	Fe
	323.261 I	3.83	1000 R	500	170	11	0.03	1071	70	Sb(0.1),Ni,Ti(0.05),W
Lu 镥	451.856 I	2.74	300	40			0.01			
	355.444 II	11.8	50	100			0.03			
	347.249 II	11.3	50	150	4800		0.03	15		
	339.705 II	11.3	50	20 r	4100		0.03	10		
	291.139 II	12.2	100	300	9000		0.01	6.2	0.5	Yb,Th,Cr,Fe,Ti,V
	290.030 II	12.0	50	150	4500		0.03	12		
	289.484 II	12.2	60	200	6300		0.03	10	0.7	
	261.542 II	10.9	100	250	18000		0.001	1	0.2	Fe,Al,Ca,Cr,Mn,Ni,V
	239.219 II	13.5	30	100			0.1			
Mg 镁	518.362 I	5.11	500 Wh	300		320	0.003			
	517.270 I	5.11	200 Wh	100 Wh		190	0.01			
	516.734 I	5.11	100 Wh	50		55	0.01			
	383.826 I	5.94	300	200	5000	1950	0.003	33	4	
	383.231 I	5.94	250	200	3000	1550	0.003	42		
	382.935 I	5.94	100 W	150		390	0.003			
	285.213 I	4.34	300 R	100 R	60000	17500	0.0001	1.6	0.2	Fe,Na(1),Cr,V,Zr,OH
	280.270 II	12.1	150	300	6000	83000	0.001	0.3	0.03	Cr,Mn,V,Ti
	279.553 II	12.1	150	300	10000	99000	0.001	0.15	0.02	Fe,Ag,Ar,Mn
	279.079 II	16.5	40	80	130	830	0.1	30	1.5	
	278.297 I	7.18	15	15		110	0.1			
	278.142 I	7.18	20	8		75	0.1			

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花（放电管）	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹)		
								(A)	(B)	
Mg 镁	277.983 I	7.18	40	50	900	420	0.03	50		
	277.829 I	7.18	25	20		80	0.1			
	277.669 I	7.18	30	20		100	0.1			
Mn 锰	482.352 I	4.89	400	80		42	0.01			
	478.342 I	4.89	400	60		35	0.01			
	475.404 I	4.89	400	60		28	0.01			
	403.449 I	3.08	250 r	20		900	0.001			
	403.307 I	3.08	400 r	20	19000	1450	0.001	47		
	403.076 I	3.08	500 r	20	27000	2100	0.001	44	2	
	293.306 II	12.8	40	100	1100	2700	0.01	13		Ni(3),In(0.1),Cr,OH
	280.106 I	4.43	600 R	60	3700	1450	0.001	21		Zn
	279.827 I	4.43	800 R	80	5100	2100	0.001	16		Mg(0.3),Ni
	279.482 I	4.44	1000 R	5	6200	2700	0.0003	12		Fe,Co
	260.569 II	12.2	100 R	500 R	4300	9900	0.003	2.1	0.4	Cr,Fe
	259.373 II	12.2	200 R	1000 R	6200	13000	0.003	1.6	0.25	Fe
	257.610 II	12.2	300 R	2000 R	12000	18000	0.003	1.4	0.14	Al,Cr,Fe,V,W,Co
Mo 钼	390.296 I	3.17	1000 R	500 R	19000	1500	0.001		3	Fe,Cr
	386.411 I	3.20	1000 R	500 R	29000	2100	0.001		2	Zr
	379.826 I	3.26	1000 R	1000 R	29000	2400	0.001		2.5	
	319.397 I	3.88	1000 r	50 r		820	0.001			
	317.035 I	3.91	1000 R	25 r		1200	0.001			Co(0.5),W,Fe(3),Ta
	313.259 I	3.96	1000 R	300 R	14000	1800	0.001		3	V,Fe,Ta
	289.099 II	12.9	30	50		650	0.01			
	287.151 II	13.0	100	100	1700	1180	0.01	27	5	
	284.823 II	13.1	125	200	1700	1800	0.003	20	5	
	281.615 II	13.2	200	300	1700	2400	0.003	14		Al(10),Cr,Fe,Mg,Mn,Ti
N 氮	567.956 II	35.2		[500]						
	567.602 II	35.2		[100]						
	566.664 II	35.1		[300]						
	410.998 I	13.70		[1000]						
	410.337 II	74.6		[70]						
	409.994 I	13.69		[150]						
	409.731 II	74.6		[100]						
Na 钠	616.076 I	4.12	500	100			0.03			
	615.423 I	4.12	500	100			0.03			
	589.592 I	2.10	5000 R	500 R	10000	300	0.0001	69	0.2	Fe,Ti,V
	588.995 I	2.11	9000 R	1000 R	20000	650	0.0001	29	0.1	
	330.299 I	3.75	300 R	150 R	150	3.0	0.03	4285	11	Zn(0.03),La,Zr
	285.303 I	4.35	80 R	15			0.1	27272		Fe
	285.283 I	4.35	100 R	20			0.1	27272		
	268.044 I	4.62	40 R				1			
	268.034 I	4.62	60 R	10			1			
Nb 铌	413.710 I	2.99	100	60		14	0.1			
	412.381 I	3.02	200	125		33	0.03			
	410.092 I	3.07	300 W	200 W		55	0.01			
	407.973 I	3.12	500 W	200 W		80	0.01			Ar,Sr
	405.894 I	3.18	1000 W	400 W		110	0.01			Mn
	358.027 I	3.59	100	300		50	0.01			
	322.548 II	11.0	150 W	800 wr	800	1100	0.01	71		
	319.498 II	11.1	30	300	1000	1500	0.1	73		Mo,Ta
	316.342 II	11.2	15	8	1200	1900	0.01	40		Ca,Cr,Fe,W,OH
	313.079 II	11.3	100	100	1500	2200	0.003	50		Be(0.001),V(0.1),Ar,Cr,Ti,Ce
	309.418 II	11.4	100	1000	1800	2500	0.003	36		Cu(1),Mo,Ca,V,Al,Cr,Fe,Mg
	295.088 II	11.6	15	200	1100	1200	0.01	75		Hf,Fe
	284.115 II	11.6	10	100		140	0.1			V(0.3)
	269.706 II	11.7	10	500	1000	960	0.005	69		Fe,Cr,V

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	
Nd 钕	430.357 II	9.2	100	40	5400		0.03	75	1.3	Ca(10),Pr(0.3),Fe
	428.452 II	9.8	30	15			0.1			
	417.732 II	9.3	15	25	2400		0.1	136		
	415.608 II	9.5	50	20	3000		0.1	107		Zr(0.1),Ca,Fe
	395.115 II	9.7	40	30	1400		0.1	176		
	311.517 II		4	2			0.3			Sm(1),Er(0.3),Yb(0.3)
Ne 氖	640.225 I	18.6		[2000]						
	585.249 I	19.0		[2000]						
	540.056 I	19.0		[2000]						
	475.273 I	21.2		[1000]						Ar
Ni 镍	547.691 I	4.09	400 W	8			0.3			
	503.537 I	6.09	300 W	5			0.3			
	471.442 I	6.00	1000	8			0.1			
	385.830 I	3.63	800 r	70 h			0.03			
	361.939 I	3.85	2000 R	150 h	6600	940	0.003		5	
	359.771 I	3.65	1000 r	50 h		80	0.03			
	356.637 I	3.90	2000 R	100 Wh		460	0.003			
	352.454 I	3.54	1000 R	100 Wh	8200	1600	0.003	45	4	V,Mo
	351.505 I	3.63	1000 R	50 h	6600	880	0.001		5	Nb
	349.296 I	3.65	1000 R	100 h	5500	710	0.003		5	
	346.165 I	3.60	800 R	50		680	0.003			
	341.477 I	3.65	1000 R	50 Wh	8200	1400	0.001	48	4	Co(0.1),Zr(1)
	313.411 I	4.17	1000 R	150		290	0.01			
	310.188 I	4.42	400 R	150		95	0.03			
	310.155 I	4.11	1000 R	150		500	0.01			
	305.082 I	4.09	1000 R			610	0.001			Co(1),V
	300.249 I	4.16	1000 R	100		600	0.001			
	228.708 II	14.9	100	500		65	0.1			
	227.021 II	14.2	100	400		240	0.1	25		
	226.446 II	14.3	150	400		150	0.1			
	225.386 II	14.4	100	300		120	0.1	25		
O 氧	844.638 I	10.98		[2000]		44				
	794.759 I	14.10		[1000]						
	777.543 I	10.73		[100]		160				
	777.414 I	10.73		[300]		260				
	777.193 I	10.73		[1000]		370				
	615.820 I	12.75		[1000]		18				
	615.678 I	12.75		[300]		12				
	615.599 I	12.75		[150]		8				
Os 锇	442.047 I	2.80	400 R	100		15	0.1			
	426.085 I	2.91	200	200		15	0.3			
	330.156 I	3.76	500 R	50		60	0.03			
	326.795 I	3.80	400 R	30		16	0.1			
	326.229 I	4.32	500 R	50		22	0.03			
	305.866 I	4.05	500 R	500	8600	105	0.03		10	Ru(3),Fe
	290.906 I	4.26	500 R	400	9600	150	0.03		8	Mo(0.1),Cr(0.3),V(0.01),Fe
	283.863 I	5.00	100 R	100		62	0.1			
	248.855 I	5.62	50 W	15		82	0.1			
P 磷	650.797 II	23.4		[600]						
	650.346 II	23.4		[600]						
	645.999 II	23.5		[600]						
	545.074 II	26.0		[400]						
	542.591 II	23.7		[400]						
	529.613 II	23.7		[400]						
	494.353 II	26.0		[500]						
	460.208 II	26.1		[600]						
	458.986 II	26.1		[500]						

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	
P 磷	458.804 II	26.1		[500]						
	255.490 I	7.14	60	[500]	150	4	0.1		250	Ca (10), V, W, Ni (1), Fe(0.3),Co
	255.325 I	7.14	80	[600]	380	9	0.1	576		
	253.565 I	7.18	100	[700]	600	21	0.03	272	60	Fe(0.03),Cr,Mn,Ti
	253.399 I	7.18	50	[500]	220	4.5	0.3	1000	150	Fe(0.03)
Pa 镤	395.78			[100]						
	305.46			[100]						
	305.35			[100]						
Pb 铅	560.88 II	17.0		[40]			1.0			
	416.805 I	5.63	20	10						Ti,Mn,Co
	405.783 I	4.38	2000 R	300 R	34000	320	0.0001	272	20	Fe,Zn
	368.347 I	4.34	300	50	14000	240	0.003	348	40	
	363.958 I	4.38	300	50 h	5500	110	0.003	576		
	283.307 I	4.37	500 R	80 R	9500	340	0.0001	142	30	Ne,Fe,Cr,Mg
	280.200 I	5.74	250 Rh	100 h	10000	250	0.0003	157	30	Ni(0.1),Mn
	266.317 I	5.97	300 Wh	40	3000	48	0.001	389		V(3),Mo,Cr(1)
	261.418 I	5.71	200 r	80	7000	180	0.003	130	40	
	239.379 I	6.50	2500	1000	1700	11	0.003	476		
	220.353 II	14.8	50 W	5000 R	1400	150	0.03	42		Nb,W,Fe
	216.999 I	5.71	1000 R	1000 R	5500	50	0.03	90		Al,Cr,Cu,Fe,Ni,W
Pd 钯	363.470 I	4.23	2000 R	1000 R	20000	600	0.001	54	6	Ar,Co,Fe,Ni,Ti
	360.955 I	4.40	1000 R	700 R	20000	550	0.003	85	6	
	351.694 I	4.49	1000 R	500 R	12000	220	0.003		9	
	342.124 I	4.58	2000 R	1000 R	13000	360	0.001	100	8	Cr,Ni(1)
	340.458 I	4.46	2000 R	1000 R	24000	1000	0.001	44	4	Fe,Mo,Zr,Co,Ti,V
	324.270 I	4.64	2000	600 R	11000	420	0.003	76	9	
	285.458 II	16.7	4	500 R		12	1			
	265.872 II	17.0	20	300		7.0	1			
	250.574 II	17.5	3	30		7.0	3			
	249.878 II	17.3	4	150 h		15.0	1			
	248.892 II	16.4	10	30	130	95.0	3	103		
Pm 钷	399.895			1000						
	395.774			1000						
	391.909			1000						
	391.026			1000						
	389.216			1000						
Po 钋	386.193			500						
	300.321 I	5.1		2500						
	266.333			700						
	255.801 I	4.8		1500						
	245.011 I	5.1		1500						
Pr 镨	422.533 II	8.7	50	40	3800		1	42	2	
	418.952 II	9.1	100	50	2500		0.3	60		
	417.942 II	8.9	200	40	5200		0.1	41		CN,Co
	406.282 II	9.2	150	50	3400		0.1		2	
	390.843 II	8.9	100	60	3100		0.1	37	2	Ca,Cr,Fe,V
	321.955 I		20	5			1			
	317.231 II		25	5			1			
	316.824 II		25	5			1			Ti(0.1),Co
	316.374 II		4				1			
	312.157 II		50	4			1			Ti(1),Co
Pt 铂	444.255 I	4.04	800	25			0.1			
	306.471 I	4.04	2000 R	300 R	3200	260	0.001	120	5	Ni(0.03),Ru(0.1),Co
	299.797 I	4.23	1000 R	200 r	1800	110	0.003		8	Cu
	292.979 I	4.23	800 R	200 W		72	0.003			
	283.030 I	4.38	1000 R	600 r		65	0.003			
	273.396 I	4.63	1000	200	1800	70	0.003	150	7	

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	
Pt 铂	270.240 I	4.68	1000	300	2000	78	0.003		6	
	265.945 I	4.66	2000 R	500 R	2800	230	0.001	81		Ru(0.3),Ta,Cr,Fe,Mg,Mn,V
Ra 镭	482.591 I	2.57		800						
	468.228 II	7.9		800						
	381.442 II	8.5		2000						
Rb 铷	794.760 I	1.56	5000 R		16000		0.001			Ar
	780.023 I	1.59	9000 R		30000		0.001			Ar,Ti
	629.833 I	3.57	1000	150			0.01			Fe
	421.556 I	2.94	1000 R	300	160		0.001		500	Sr(0.001),CN
	420.185 I	2.95	2000 R	500	320		0.003	37500	250	Fe,CN,Ar,Mn,Ni,V
Re 铼	488.917 I	2.53	2000 W							Fe
	346.473 I	3.57	100		40000		0.001		2.5	Sr(0.03)
	346.046 I	3.58	1000 W		55000		0.003	115	2	Mo,Mn(0.05),Cr
	345.181 I	3.59	100		16000		0.003		6	Fe
Rh 铑	437.480 I	3.54	1000	500		50				
	369.236 I	3.35	500	150	940	560		8.5	7	
	365.799 I	3.57	500 W	200 W	8200	250		150	8	
	352.802 I	3.70	1000	150		280				
	350.252 I	3.53	1000	150		220				
	343.489 I	3.60	1000 r	200 r		710	0.001	60		Mo(0.3),V
	339.685 I	3.64	1000 W	500	5600	280		125		Fe
	332.309 I	3.92	1000	200		145	0.003			Ti(0.1),Ir(1)
Rn 氡	745.000 I	8.43		[600]						
	705.542 I	8.53		[400]						
	434.960 I	9.62		[5000]						
Ru 钌	379.935 I	3.26	3000 R	150		160				
	379.890 I	3.41	3000 R	150		100				
	372.803 I	3.32	9000 R	300	11000	315		120	6	
	359.618 I	3.70	2000 R	200		50				
	349.894 I	3.54	6000 R	600	8300	280		111	7	Rh(0.3)
	343.674 I	3.75	3000 R	150			0.01			Ni(0.1),Ir,Co
	294.567 II	14.0	100	500		65				
	269.212 II	13.4	250	400	330	250		90		
	267.876 II	13.3	300	800	690	730	<0.1	36	3	V,Cr,Zr,Fe,Mn
S 硫	921.291 I	7.9		[200]						
	545.388 II	26.3		[750]						
	481.552 II	26.6		[800]						
	416.270 II	29.3		[600]						
Sb 锑	326.750 I	5.82	150	150 Wh		10	0.03			V(0.03)
	287.792 I	5.36	250 W	150	1400	26	0.01	638	40	Cr(0.2),V(0.3)
	259.806 I	5.98	200	100	6000	95	0.001	107	7	Fe,Mn(5)
	252.852 I	6.12	300 R	200	3200	85	0.001	107	14	Si(0.003),Cr,Fe,Mg,Mn,V
	231.147 I	5.36	150 R	50	2200	70	0.01	61	13	Fe,Ni
Sc 钪	431.408 II	10.1	50	150	4200		0.001	7.9		
	424.683 II	9.8	80	500	15000		0.0003	2.7	0.2	Ce(1),Fe
	402.369 I	3.10	100	25						
	402.040 I	3.08	50	20						
	391.181 I	3.19	150	30						
	390.749 I	3.17	125	25						
	364.279 II	10.0	60	50	6600			8.6		
	363.075 II	10.0	50	70	20000			2.[illegible]	0.09	Ca,Cr,Fe,V
	361.384 II	10.1	40	70	28000			1.5	0.06	Cr,Cu,Fe,Ti
	335.373 II	10.5	50	60	9900		0.001	3.8	0.14	Zr(0.3),Fe,Co,W
Se 硒	484.063 II	24.4	10	800						
	473.903 I	8.59		800						
	473.078 I	8.59		1000						
	206.279 I	6.30		800	11000		0.3	300		Al,Cr,Fe,Ni,Ti,V

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	
Se 硒	203.985 I	6.33		1000	40000			115		Al,Cr,Fe,Mn
	196.026 I	6.32	100	100 R	90000			75		
Si 硅	288.158 I	5.08	500	400	2600	720	0.0005	27	4	Cr,Fe,Mg,V,Co,Ce,Ta
	252.851 I	4.93	400	500	2000	280	0.001	31	5	
	252.411 I	4.92	400	400	2400	240	0.001	40	4	
	251.611 I	4.95	500	500	3600	850	0.001	12	3	Cr,Fe,Mn,V,Mo,W
	250.690 I	4.95	300	200	1700	280	0.003	30	6	Al,Cr,Fe,V
	243.516 I	5.87	150	80	320	50	0.03	83		
	221.668 I	5.62	40	40	480	75		41		
	212.412 I	6.62	200 R	50	2200	90		16		
Sm 钐	443.434 II	9.8	200	200	1800			83		
	442.435 II	9.9	300	300	2900			54		Nd,Cr,Ca,Ti,V
	439.087 II	9.6	150	150						
	428.078 II	10.0	200	200	2200			69		
	427.967 II	9.8	100	100			0.03			Ce(10),Fe
	426.268 II	9.9	200	150			0.03			Ti(1),Cr
	336.587 II		25	10			0.03			Ce(10),Cr
Sn 锡	452.474 I	4.87	500	50						
	326.234 I	4.87	400	300		57				
	317.502 I	4.33	500 h	400 hr	5500	65	0.001	214		Mo,Fe,Co
	303.412 I	4.30	200 Wh	150 Wh	8500	50	0.001		40	Cr(0.03),V(0.1)
	300.914 I	4.33	300 h	200 h	7000	28	0.001		50	
	286.333 I	4.32	300 R	300 R	10000	43	0.0003	214	30	
	283.999 I	4.78	300 R	300 R	1400	90	0.0003	111	25	Cr(0.2),Mn(3),Al,Fe,Mg,Ti,V,Nb
	242.950 I	5.51	200 R	250 R	5500	38	0.003	96		Fe,Mn,Mo,Co
	242.169 I	6.18	150 R	200 R	3600	20	0.003	157		
Sr 锶	483.208 I	4.34	200	8		5.0				
	460.733 I	2.69	1000 R	50 R	6500	400	0.0003	68	2	Mn,Fe
	421.552 II	8.6	300 r	400 W	32000	63000		0.77	0.03	Rb,CN,Fe
	407.771 II	8.7	400 r	500 W	46000	120000	0.001	0.42	0.02	Yb(0.01),CN,Co,La,Cr,Fe,Ti
	346.446 II	12.3	200	200	950	1050	0.001	23	0.06	Re,Yb,CN
	338.071 II	12.3	150	200	650	780		34	0.08	
Ta 钽	331.116 I	4.4	300	70		17	0.01			W(1),Ar
	271.467 I	5.05	200	8			0.01			Fe(3),Co
	268.511 II	12.5	15	25	1500	700	0.01	30	2.5	Fe,Ti(1),V,W
	265.327 I	4.9	200	15		45				Mo(0.3)
	264.747 I	4.7	200	10		38				
Tb 铽	432.648 I		150	4			0.03			Ti(1),Mn
	427.852 II		200	100			0.03			Ti(0.3),W
	387.419 II	>3.2	200	200	3500			62		
	384.876 II	>3.2	100	200	3700		0.1	55		La,Ce,Sm
	356.174 II	>3.5	200	200	3200			63		
	350.917 II	>3.5	200	200	5700			23	1	CN,Cr,Fe,Ti,V
Tc 锝	429.706 I	2.9	500	300						
	426.226 I	2.9	400	200						
	423.819 I	2.9	300	150						
	363.610 I	3.7	400	200						
	264.702 II	11.9	300	600						Ar
	261.000 II	12.0	400	800						
	254.324 II	12.1	500	1000						
Te 碲	238.576 I	5.8	120	60	1500	14	0.01	176	40	
	238.325 I	5.8	100	60	1200	7.5	0.01	272	50	Fe,Cr
	214.275 I	5.8	120		18000	25		41		
	200.202 I				26000	1.0		250		
	199.418 I				14000	0.3		476		
Th 钍	439.111 II	10.4	50	40		300				
	438.186 II	10.7	30	30	1300	350			11	

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度 电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	检出限 碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	(B)	干扰元素及浓度(w/%)
Th 钍	401.914 II	10.1	8	8	4200	1070		83	2.5	Ca,Cu,Mn
	374.119 II	10.5	80	80	1300	700		96	8	
	287.041 II	11.6	18	20	550	300	0.01	130		Cr,V
	283.730 II		15	10	1200	720	0.01	65		Zr(0.1),W,U(1),Cr,Fe,Mg,Ni,V
	275.217 II	11.7	15	12	410	230	0.01	130		Zr(0.01),Mn
Ti 钛	498.173 I	3.33	300	125		45				
	399.864 I	3.14	150	100		85				
	365.350 I	3.44	500	200			0.03			
	364.268 I	3.42	300	125		95				
	363.546 I	3.40	200	100		80				
	338.376 II	10.5	70	300 R	5700	5100		8.1	0.7	
	337.280 II	10.5	80	400 R	5700	6800	0.003	6.7	0.6	Ni,V
	336.121 II	10.5	100	600 R	7200	8800		5.3	0.5	Ca,Cr,Ni,V
	334.904 II	11.1	125	800 R	4300	1800		7.5		
	323.452 II	10.7	100	500 r	6600	7700		5.4	0.6	Ar,Cr,Fe,Mn,Ni,V
	308.803 II	10.9	70	500 R	3600	4000	0.001	7.7		V,Cu(1),Ar,Nb,Ta,Mo,Ni
	307.865 II	10.9	60	500 R	2300	2700	0.001	8.1		
Tl 铊	535.046 I	3.28	5000 R	2000 R		37	0.001			Ca,Ar
	377.572 I	3.28	3000 R	1000 R	12000	120	0.001	230	11	Ni(0.3),CN,Ca,Fe,Ti,V
	351.924 I	4.49	2000 R	1000 R	20000	120	0.003	200	6	CN,Cr,Fe,Ni,V
	322.975 I	4.77	2000	800						
	291.832 I	5.18	400 R	200 R	2800	12	0.1	1034	30	Fe
	276.787 I	4.44	400 R	300 R	4400	120	0.01	120		Fe(0.5),Cr,Ag,Mg,Mn,Ti,V
Tm 铥	418.762 I	3.0	300	30			0.01			La(0.1),Fe,CN
	376.192 II	9.9	200	120	4800		0.1	13		Ti
	376.133 II	9.9	250	150	6000		0.1	11		
	346.221 II	10.2	250	200	8500			8.1	0.3	Ca,Cr,Fe,Ni,V
	313.126 II	10.6	400	500	7400		0.01	5.2	0.4	Ce(1),Ti(0.3),Be(0.0003),Nb
U 铀	424.167 II	7.5	40	50	1000	105		461		
	409.014 II	7.2	25	40	2200	170		337	20	
	385.958 II	7.2	20	30	4900	300		250	8	Ca,Cr,Fe
	302.221		12	12		40	0.1			Co(0.01)
	290.828		12	30	780	50	0.1	500		Nb(0.1)
	286.568 II	8.3	30	50		48	0.05			Zr(0.3),Cr,W,Nb(0.1)
V 钒	438.472 I	2.88	125 R	125 R		190				
	437.924 I	3.13	200 R	200 R	12000	300	0.003	17	9	
	411.179 I	3.31	100 R	100 R		170				
	318.540 I	3.96	500 R	400 R		280	0.001			Fe
	318.398 I	3.90	500 R	400 R		190	0.001			Fe,W(3)
	318.341 I	3.91	200 R	100 R		150	0.001			
	312.528 II	11.1	80	200 R	750	3000		15		
	311.838 II	11.1	70	200 R	2000	4100		12		
	311.071 II	11.1	70	300 R	2600	5600		10	0.9	
	310.230 II	11.1	70	300 R	3000	7000		6.4	0.8	Fe,Ni,Ti
	309.311 II	11.2	100 R	400 R	3800	9400		5.0	0.6	Al,Cr,Fe,Mg
	290.308 II	11.3	35	150 R		300	0.01			Mo
W 钨	430.211 I	3.24	60	60						
	429.461 I	3.25	50	50						
	407.436 I	3.40	50	45						
	400.875 I	3.45	45	45			0.01			Ti,Mo,Pr
	361.379 II	13.2	10	30						
	321.556 I	4.6	10	9						
	294.698 I	4.57	20	18			0.01			Mo,Nb(0.1),Cr(1)
	294.440 I	4.57	30	20			0.01			Ga,Fe,V,Mo
	289.645 I	4.63	15	25			0.03			V(0.1)

续表

元素	λ/nm	激发电位 E/eV	强度				检出限			干扰元素及浓度(w/%)
			电弧	火花(放电管)	经典光源	ICP	碳电弧/%	ICP/(μg·ml⁻¹) (A)	ICP/(μg·ml⁻¹) (B)	
W 钨	289.601 I	4.50	10	12			0.03			V(0.1)
	216.632 II	6.30	10	30	15000	22		75		
	202.998 II	6.36	10	30	15000	9.5		75		
	200.807 II	6.76	12	25	13000	7.5		71		
Xe 氙	467.123 I	11.0		[2000]						
	462.428 I	11.0		[1000]						
	450.098 I	10.1		[500]						
Y 钇	467.485 I	2.72	80	100						
	464.370 I	2.67	50	100						
	437.494 II	9.6	150	150	12000		0.001	6.5	0.13	Mn
	417.754 II	9.8	150	50	8000			11	0.2	
	410.238 II	9.5	50	30			0.001			
	378.870 II	9.8	30	30	7400			7.5		
	377.433 II	9.8	12	100	10000		0.003	5.3	0.11	Fe,Mn,Ti,V
	371.029 II	9.9	80	150	13000		0.003	3.5	0.08	Ti,Y
	363.312 II	9.8	50	100	7800			8.3		
	360.073 II	10.0	100	300	10000			4.8	0.10	
	324.228 II	10.4	60	100	6200		0.003	4.5		Ti(0.01),U(1),Fe,Cu,Ni,Zr
	321.668 II	10.4	40	70	3900		0.003	7.9		Ti(0.1),Mn(0.5),Ni,V,Ar
Yb 镱	398.799 I	3.1	1000 R	500 R	3200		0.0003		4.0	
	369.420 II	9.6	500 R	1000 R			0.0003	3.0	0.10	Ca,Fe,Mn,Ni,Ti,V
	328.937 II	10.0	500 R	1000 R	18000		0.0003	1.8	0.14	Mo(0.1),V(0.3),Fe,Cu,Ti
	289.138 II	10.5	50	100	3600		0.01	8.6	0.5	
	265.375 II	13.5	50	200	990		0.03	21		Er(1)
Zn 锌	636.235 I	7.74	1000	500						
	481.053 I	6.66	400	300	1400	45	0.03	230	50	Cr
	472.216 I	6.66	400	300	1000	30		230	70	Bi
	468.014 I	6.66	300	200	400	10			150	
	334.557 I	7.78	500	100	300	17		750	110	
	334.502 I	7.78	800	300	1400	95	0.01	136	25	Mo(0.1),Mn(1),Cr(3),Ce,Zr
	330.259 I	7.78	800	300	900	50	0.01	230	40	Na(0.1)
	328.233 I	7.78	500 R	300	200	22	0.03	500		Ti(0.1)
	307.206 I	8.11	200	125	260					
	255.796 II	20.4	10	300						
	250.200 II	20.4	20	400 W						
	213.856 I	5.80	800 R	500	10000	1020	0.001	1.8	0.3	Fe,Cu,Al,Ni,Ti,V
	206.191 II	15.4	100	100	10000	185		5.9		Al,Cr,Fe,Ni,Ti
	202.551 II	15.5	200	200	3000	215		4.0		
Zr 锆	468.780 I	3.37	125			40				
	360.119 I	3.59	400	15		75				
	357.247 II	3.46	60	80	2100	3800		10		
	354.768 I	3.56	200	12		55				
	351.961 I	3.52	100	10		45				
	349.621 II	10.5	100	100	4100	5000		10	0.9	Mn,Co
	343.823 II	10.6	250	200	4700	6500	0.001	7.1	0.8	V,Fe,Ca,Cr,Mn,Ti,Nb
	339.198 II	10.7	300	400	5700	8000	0.001	7.7	0.6	Ni(0.1),Fe,Th,Cr,Ti,V,Mo,OH
	267.863 II	11.6	80	100	1800	1300	0.003	15	1.4	Nb,Cr,V(0.1)
	257.139 II	11.7	300 R	400 R	2100	1300	0.003	9.7	1.2	Nb,W,Mo(0.3),Sn,Cr,Fe,Hf,Mg,Mn,Ti,Y

① 表中[ ]表示在放电管中的强度,d 表示双线,r 表示窄谱线自蚀,R 表示宽谱线自蚀,w 表示宽或复合的,W 表示非常宽或复合的,b 表示模糊的、发散的。

表 2-6 按波长排列的元素灵敏线及其强度[3]

λ/nm	元素	强度		灵敏度①	λ/nm	元素	强度		灵敏度①
		电弧	火花[放电管]				电弧	火花[放电管]	
923.749	S I		[200]	U 6	516.7343	Mg I	100	50	—
922.811	S I	—	[200]	U 5	516.120	I II	—	[300]	—
921.291	S I	—	[200]	U 4	515.3235	Cu I	600	—	U 4
894.350	Cs I	2000 R	—	U 2	510.5541	Cu I	500	—	U 5
852.110	Cs I	5000 R	—	U 1	500.7213	Ti I	200	40	—
811.5311	Ar I	—	[5000]	U 2	499.9510	Ti I	200	80	—
794.760	Rb I	5000 R	—	U 2	499.1066	Ti I	200	100	—
780.0227	Rb I	9000 R	—	U 1	498.1733	Ti I	300	125	U 1
777.5433	O I	—	[100]	U 4	496.2263	Sr I	40	—	U 4
777.4138	O I	—	[300]	U 3	493.4086	Ba II	400	400	V 2
777.1928	O I	—	[1000]	U 2	488.914	Re I	2000	—	U 2
769.8959	K I	5000 R	200	U 2	487.2493	Sr I	25	—	U 3
766.4899	K I	9000 R	400	U 1	486.1327	H I	—	[500]	U 3
750.3868	Ar I	—	[700]	U 4	483.2075	Sr I	200	8	U 2
745.000	Rn I	—	[600]	U 2	482.591	Ra I	—	[800]	U 1
706.7217	Ar I	—	[400]	U 3	481.946	Cl II	—	[200]	V 4
705.542	Rn I	—	[400]	U 3	481.671	Br II		[300]	V 3
696.5430	Ar I		[400]	U 3	481.5515	S I	—	[800]	—
690.246	F I	—	[500]	U 3	481.0534	Zn I	400	300	—
685.602	F I		[1000]	U 2	481.006	Cl II		[200]	V 3
670.7844	Li I	3000 R	200	U 1	479.992	Cd I	300	300	—
656.273	H I	—	[3000]	U 2	479.454	Cl II	—	[250]	V 2
643.84696	Cd I	2000	1000	—	478.550	Br II	—	[400]	V 2
640.2246	Ne I	—	[2000]	—	477.2312	Zr I	100	—	—
636.2347	Zn I	1000	500	—	474.225	Se I	—	[500]	U 6
624.9929	La I	300	—	U 1	473.9478	Zr I	100	—	—
624.336	Al II	—	800	V 3	473.903	Se I	—	[800]	U 5
623.176	Al II		35	—	473.078	Se I	—	[1000]	U 4
610.3642	Li I	2000 R	300	U3	472.2552	Bi I	1000	100	—
593.068	La I	250	—	U 2	472.2159	Zn I	400	300	—
589.5923	Na I	5000 R	500 R	U 2	471.0075	Zr I	60	—	—
588.9953	Na I	9000 R	1000 R	U 1	470.486	Br II	—	[250]	V 1
587.5618	He I	—	[1000]	U 3	469.625	S I	—	[15]	U 9
587.0915	Kr I	—	[3000]	U 2	469.545	S I	—	[30]	U 8
585.2488	Ne I	—	[2000]	—	469.413	S I	—	[50]	U 7
577.762	Ba I	500 R	100R	U 2	468.7803	Zr I	125	—	U 4
568.8224	Na I	300	—	—	468.575	He II	—	[300]	—
568.2657	Na I	80	—	—	468.228	Ra II	—	[800]	U2
567.956	N II	—	[500]	V 2	468.0138	Zn I	300	200	—
567.602	N II	—	[100]	V 4	467.4848	Y I	80	100	U 1
566.664	N II	—	[300]	V 3	467.1226	Xe I	—	[2000]	U 2
560.88	Pb II	—	[40]	V 2	464.3695	Y I	50	100	U 2
557.0289	Kr I		[2000]	U 3	462.4276	Xe I	—	[1000]	U 3
553.548	Ba I	1000 R	200 R	U 1	460.7331	Sr I	1000 R	50 R	U 1
551.905	Ba I	200	60	U 3	460.2863	Li I	800	—	U 4
546.5487	Ag I	1000 R	500 R	U 4	459.3177	Cs I	1000 R	50R	U 4
546.462	I II	—	[900]	—	455.5355	Cs I	2000 R	100	U 3
546.074	Hg I	—	[2000]	—	455.403	Ba II	1000 R	200	V 1
545.5146	La I	200	1	U 3	453.6053	Ti I	40	20	—
542.455	Ba I	100 R	30 R	U 4	453.5922	Ti I	40	20	—
540.0562	Ne I	—	[2000]	—	453.5575	Ti I	80	50	—
535.046	Tl I	5000 R	2000 R	U 1	453.4782	Ti I	100	40	—
529.10	bhCaF②	200	—	—	453.3244	Ti I	150	40	—
521.8202	Cu I	700	—	U 3	452.4741	Sn I	500	50	—
520.9067	Ag I	1500 R	1000 R	U 3	451.856	Lu I	300	40	—
520.844	Cr I	500 R	100	U 4	451.1323	In I	5000 R	4000 R	U 1
520.604	Cr I	500 R	200	U 5	450.0977	Xe I	—	500	U 4
520.452	Cr I	400 R	100	U 6	445.4781	Ca I	200	5	U 2
518.3618	Mg I	500	300	—	443.496	Ca I	150	25	U 3
517.2699	Mg I	200	100	—	443.434	Sm II	200	200	V 2

续表

λ/nm	元素	强度		灵敏度①
		电弧	火花[放电管]	
442.5441	Ca I	100	20	U 4
442.435	Sm II	300	300	V 1
442.0468	Os I	400 R	100	—
440.8511	V I	30 R	20	—
440.4753	Fe I	1000	700	—
439.1114	Th II	50	40	—
439.087	Sm II	150	150	—
438.9974	V I	80 R	60 R	—
438.4722	V I	125 R	125 R	—
438.3547	Fe I	1000	800	—
438.1859	Th II	30	30	—
437.9238	V I	200 R	200 R	U 1
437.4935	Y II	150	150	—
437.480	Rh I	1000	500	—
435.835	Hg I	3000	500	—
432.5765	Fe I	1000	700	—
431.409	Sc II	50	150	—
430.7905	Fe I	1000 R	800 R	—
430.5916	Ti I	300	150	—
430.5447	Sr II	40	—	—
430.3573	Nd II	100	40	—
430.2108	W I	60	60	U 1
429.706	Te I	500	300	—
429.4614	W I	50	50	U 2
429.09	Np	—	50	—
428.972	Cr I	3000 R	800 R	U 3
427.480	Cr I	4000 R	800 R	U 2
427.1763	Fe I	1000	700	—
426.7258	C II	—	500	V 2
426.7003	C II	—	350	V 3
426.226	Te I	400	200	—
426.0854	Os I	200	200	—
425.435	Cr I	5000 R	1000 R	U 1
424.6829	Sc II	80	500	—
424.1669	U II	40	50	—
423.819	Te I	300	150	—
422.6728	Ca I	500 R	50 R	U 1
422.657	Ge I	200	50	—
422.5327	Pr II	50	40	—
421.5556	Rb I	1000 R	300	U 4
421.5524	Sr II	300 R	400	V 2
421.175	Dy	200	—	—
420.505	Eu II	200 R	50	—
420.1851	Rb I	2000 R	500	U 3
418.952	Pr II	100	50	—
418.6599	Ce II	80	25	—
418.312	Ac I	500	20	—
417.998	Ac I	1000	50	—
417.942	Pr II	200	40	—
417.754	Y II	50	50	—
417.732	Nd	15	25	—
417.206	Ga I	2000 R	1000 R	U 1
416.799	Dy	50	—	—
416.5606	Ce II	40	6	—
416.2698	S II	—	[600]	—
413.7646	Ce II	25	12	—
413.7095	Nb I	100	60	U 3
413.3800	Ce II	35	8	—
413.0664	Ba II	50 R	60	V 3
412.973	Eu II	100 R	50 R	—
412.3810	Nb I	200	125	U 4
412.323	La II	500	500	V 4
412.1319	Co I	1000 R	25	—
411.8773	Co I	1000 R	—	—
411.1785	V I	100 R	100 R	—
410.998	N I	—	[1000]	U 2
410.337	N II	—	[70]	—
410.1773	In I	2000 R	1000 R	U 2
410.0923	Nb I	300	200	U 3
409.994	N I	—	[150]	U 3
409.731	N II	—	[100]	—
409.3161	Hf II	25	20	—
409.014	U II	25	40	—
408.844	Ac II	2000	3000	—
407.9729	Nb I	500	200	U 2
407.798	Dy I	150 R	100	—
407.7714	Sr II	400 R	500	V 1
407.735	La II	600	400	V 3
407.4364	W I	50	45	—
406.3596	Fe I	400	300	—
406.282	Pr II	150	50	—
405.894	Nb I	1000	400	U 1
405.783	Pb I	2000 R	300 R	U 1
404.7201	K I	400	200	U 4
404.6561	Hg I	200	300	—
404.599	Dy	150	12	—
404.5815	Fe I	400	300	
404.4140	K I	800	400	U 3
404.0762	Ce II	70	5	—
403.4490	Mn I	250 R	20	U 3
403.3073	Mn I	400 R	20	U 2
403.298	Ga I	1000 R	500 R	U 2
403.0755	Mn I	500 R	20	U 1
402.3688	Sc I	100	25	U 3
402.0399	Sc I	50	20	U 4
401.914	Th II	8	8	—
401.2388	Ce II	60	20	—
400.8753	W I	45	45	U 3
400.048	Dy	400	300	—
399.896	Pm	—	1000	—
399.8640	Ti I	150	100	—
399.5310	Co I	1000 R	20	—
398.97	Pu	—	100	—
398.799	Yb I	1000 R	500 R	—
396.8468	Ca II	500 R	500 R	V 2
396.1527	Al I	3000	2000	U 1
395.78	Pa	—	100	—
395.774	Pm	—	1000	—
395.1154	Nd II	40	30	—
394.910	La II	1000	800	V 2
394.403	Al I	2000	1000	U 2
393.3666	Ca II	600 R	600 R	V 1
391.909	Pm	—	1000	—
391.1810	Sc I	150	30	U 1
391.026	Pm	—	1000	—
390.749	Sc I	125	25	U 2
390.72	Pu II	—	100	—
390.634	Er II	25	12	—
390.5528	Si I	20	15	—
390.2963	Mo I	1000 R	500 R	U 3

续表

λ/nm	元素	强度		灵敏度①
		电弧	火花[放电管]	
389.216	Pm	—	1000	—
389.1785	Ba I	18	25	V 4
389.102	Ho	200	40	—
388.865	He I	—	[1000]	U 2
387.419	Tb	200	200	—
386.4110	Mo I	1000 R	500 R	U 2
386.193	Po	500	—	—
385.9580	U I	20	30	—
384.876	Tb	100	200	—
383.8258	Mg I	300	200	U 2
383.2306	Mg I	250	200	U 3
382.9350	Mg I	100	150	U 4
382.93	Np	—	10	—
381.442	Ra II	—	[2000]	V 1
380.1529	Ce II	25	3	—
379.935	Ru I	3000 R	150	—
379.890	Ru I	3000 R	150	—
379.8252	Mo I	1000 R	1000 R	U 1
378.8697	Y II	30	30	—
377.572	Tl I	3000	1000 R	U 2
377.4332	Y II	12	100	—
376.839	Gd II	20	20	—
376.192	Tm II	200	120	—
376.1333	Tm II	250	150	—
374.8264	Fe I	500	200	U 4
374.817	Ho	60	40	—
374.5901	Fe I	150	100	U 5
374.5562	Fe I	500	500	U 3
374.119	Th II	80	80	—
373.7133	Fe I	1000 R	600	U 2
373.4866	Fe I	1000 R	600	—
372.803	Ru I	9000 R	300	—
371.9937	Fe I	1000 R	700	U 1
371.0290	Y II	80	150	V 1
369.4203	Yb II	500 R	1000 R	—
369.264	Er II	20	12	—
369.2357	Rh I	500	150	—
368.3471	Pb I	300	50	U 2
367.258	U	8	15	—
367.007	U II	15	18	—
366.3276	Hg I	500	400	U 5
365.799	Rh I	500	200	—
365.4833	Hg I	—	[200]	U 4
365.3496	Ti I	500	200	U 2
365.0146	Hg I	200	500	U 3
364.619	Gd II	200	150	—
364.2785	Sc II	60	50	V 3
364.2675	Ti II	300	125	—
363.9580	Pb I	300	50	—
363.610	Tc I	400	200	—
363.5463	Ti I	200	100	—
363.4695	Pd I	2000 R	1000 R	U 3
363.3123	Y II	50	100	—
363.075	Sc II	50	70	V 2
361.9392	Ni I	2000 R	150	—
361.3836	Sc II	40	70	V 1
361.3790	W II	10	30	—
361.0510	Cd I	1000	500	—
360.9548	Pd I	1000 R	700 R	—
360.533	Cr I	500 R	400 R	—
360.1193	Zr I	400	15	U 1
360.104	Th II	8	10	—
360.0734	Y II	100	300	—
359.618	Ru I	2000 R	200	U 3
359.349	Cr I	500 R	400 R	—
358.1195	Fe I	1000 R	600 R	—
358.027	Nb I	100	300	—
357.869	Cr I	500 R	400 R	—
357.253	Sc II	30	50	—
357.2473	Zr II	60	80	V 4
356.174	Tb	200	200	—
356.0798	Ce II	300	2	—
355.444	Lu II	50	100	—
355.217	U	8	12	—
354.7682	Zr I	200	12	U 2
353.875	Th II	—	50	—
352.9813	Co I	1000 R	30	U3
352.8024	Rh I	1000	150	—
352.4541	Ni I	1000 R	100	—
351.9605	Zr I	100	10	U 3
351.924	Ti I	2000 R	1000 R	U 3
351.6943	Pd I	1000 R	500 R	—
351.5054	Ni I	1000 R	50	—
351.3645	Ir I	100	100	U 2
350.917	Tb	200	200	—
350.252	Rb I	1000	150	—
350.2279	Co I	2000 R	20	—
349.911	Er II	18	15	—
349.894	Ru I	6000 R	600	U 1
349.6210	Zr II	100	100	V 3
349.2956	Ni I	1000 R	100	U 2
347.4887	Sr II	80	50	—
347.249	Lu II	50	150	—
346.6201	Cd I	1000	500	—
346.5800	Co I	2000 R	25	U 2
346.473	Re I	7000 R	5000	—
346.4457	Sr II	200	200	—
346.221	Tm II	250	200	—
346.1652	Ni I	800 R	50	—
346.046	Re I	1000	—	U 1
345.3505	Co I	3000 R	200	U 1
345.188	Re I	4000 R	3000	—
345.141	B II	—	100	V 2
343.8230	Zr II	250	200	V 2
343.7015	Ir I	20	15	—
343.6737	Ru I	3000 R	150	U 2
343.4893	Rh I	1000 R	200 R	U 1
342.462	Re I	300	—	—
342.124	Pd I	2000 R	1000 R	U 2
341.4765	Ni I	1000 R	50	U 1
341.2339	Co I	1000 R	100	
340.666	Ta	70	18	—
340.5120	Co I	2000 R	150	—
340.4580	Pd I	2000 R	1000 R	U 1
340.3653	Cd I	800	500	—
339.705	Lu	50	20 R	—
339.685	Rh I	1000	500	—
339.1975	Zr II	300	400	V 1
338.3761	Ti II	70	300 R	—
338.2891	Ag I	1000 R	700 R	U 2

续表

λ/nm	元素		强度		灵敏度①	λ/nm	元素		强度		灵敏度①
			电弧	火花[放电管]					电弧	火花[放电管]	
338.0711	Sr	II	150	200	—	308.2155	Al	I	800 R	800 R	U 4
337.2800	Ti	II	80	400 R	V 3	307.2877	Hf	I	80	18	—
336.1213	Ti	II	100	600 R	V 2	307.158	Ba	I	100 R	50 R	U 5
334.9035	Ti	II	125	800 R	V 1	306.7716	Bi	I	3000 R	2000	U 1
334.5020	Zn	I	800	300	U 2	306.4712	Pt	I	2000 R	300 R	U 1
332.3092	Rh	I	1000	200	—	305.866	Os	I	500 R	500	—
332.1343	Be	I	1000 R	30	U 2	305.46	Pa		—	100	—
332.1086	Be	I	100	15	U 3	305.35	Pa		—	100	—
332.1013	Be	I	50	—	U 4	305.0819	Ni	I	1000 R	—	—
331.8840	Ta	I	125	35	—	303.9356	In	I	1000 R	500 R	U 4
331.1162	Ta	I	300	70	U 1	303.9066	Ge	I	1000	1000	U 2
330.299	Na	I	300 R	150 R	U 4	303.4121	Sn	I	200	150	—
330.2588	Zn	I	800	300	U 3	302.0641	Fe	I	1000 R	600 R	—
330.232	Na	I	600 R	300 R	U 3	300.9136	Sn	I	300	200	—
330.1559	Os	I	500 R	50	—	300.321	Po	I	2500		—
329.059	Th	II	—	40	—	300.2491	Ni	I	1000 R	100	—
328.937	Yb	II	500 R	1000 R	—	299.7967	Pt	I	1000 R	200 R	—
328.2333	Zn	I	500 R	300	U 4	298.9029	Bi	I	250	100	—
328.0683	Ag	I	2000 R	1000 R	U 1	297.659	Ru	II	50	200	—
327.3962	Cu	I	3000 R	1500 R	U 2	296.929	Am	II	—	1000	—
326.9489	Ge	I	300	300	U 3	296.555	Ru	II	75	200	—
326.7945	Os	I	400 R	30	—	294.6981	W	I	20	18	—
326.751	Sb	I	150	150	—	294.567	Ru	II	100	500	—
326.2340	Sn	I	400	300	U 3	294.4395	W	I	30	20	—
326.2290	Os	I	500 R	50	—	294.3637	Ga	I	10	20 R	U 3
326.106	Cd	I	300	300	—	294.077	Hf	II	60	12	—
325.8564	In	I	500 R	300 R	U 5	293.830	Bi	I	300	300	—
325.6090	In	I	1500 R	600 R	U 3	293.677	Ho		—	1000 R	—
324.7540	Cu	I	5000 R	2000 R	U 1	292.9794	Pt	I	800 R	200	—
324.2703	Pd	I	2000	600 R	—	292.4792	Ir	I	25	15	—
324.2280	Y	II	60	100	—	291.832	Tl	I	400 R	200 R	—
323.702	Tc	II	200	400	—	291.6481	Hf	I	50	15	—
323.4516	Ti	II	100	500 R	—	291.139	Lu		100	300	—
323.261	Li	I	1000 R	500	U 2	290.912	Mo	II	25	40	V 5
323.252	Sb	I	150	250	—	290.9061	Os	I	500 R	400	U 1
322.975	Tl	I	2000	800	—	290.4408	Hf	I	30	6	—
322.5479	Nb	II	150	800	—	289.871	As	I	25 R	40	—
322.0780	Ir	I	100	30	U 1	289.8259	Hf	I	50	12	—
321.5560	W	I	10	9	—	289.7975	Bi	I	500 R	500 R	U 2
321.201	Tc	II	80	300	—	289.484	Lu	I	60	200	—
319.498	Nb	II	30	300		289.0994	Mo	II	30	50	V 4
318.5396	V	I	500 R	400 R	U 2	288.158	Si	I	500	400	U 1
318.3982	V	I	500 R	400 R	—	287.7915	Sb	I	250	150	—
318.3406	V	I	200 R	100 R	—	287.4244	Ga	I	10	15 R	U 4
317.9332	Ca	II	100	400	V 3	287.1508	Mo	II	100	100	V 3
317.5047	Sn	I	500	400	—	286.333	Sn	I	300 R	300 R	U 2
316.3402	Nb	II	15	8	—	286.098	Cr	II	60	100	V 5
315.8869	Ca	II	100	300	V 4	286.044	As	I	50 R	50	—
313.472	Hf	II	80	125	—	285.568	Cr	II	60	200	V 4
313.3321	Ir	I	40	2	—	285.4581	Pd	II	4	500	—
313.1072	Be	II	200	150	V 2	285.2129	Mg	I	300 R	100 R	U 1
313.079	Nb	II	100	100	—	284.984	Cr	II	80	150 R	V 3
313.0416	Be	II	200	200	V 1	284.9725	Ir	I	40	20	—
312.5284	V	II	80	200 R	—	284.823	Mo	II	125	200	V 2
311.8383	V	II	70	200 R	V 4	284.325	Cr	II	125	400 R	V 2
311.0706	V	II	70	300 R	V 3	283.9989	Sn	I	300 R	300 R	U 1
310.2299	V	II	70	300 R	V 2	283.7602	C	II	—	40	V 5
309.418	Nb	II	100	1000	V 1	283.730	Th		15	10	—
309.3108	V	II	100 R	400 R	V 1	283.6710	C	II		200	V 4
309.2713	Al	I	1000	1000	U 3	283.5633	Cr	II	100	400 R	V 1

续表

λ/nm	元素	强度		灵敏度[1]	λ/nm	元素	强度		灵敏度[1]
		电弧	火花[放电管]				电弧	火花[放电管]	
283.306	Pb I	500 R	80 R	—	257.293	Cd II	3	150	—
283.226	Am II	—	5000	—	255.801	Po I	1500	—	—
283.0295	Pt I	1000 R	600 R	—	255.7958	Zn II	10	300	V 3
282.4448	Ir I	20	15	—	255.493	P I	—	500	—
282.0224	Hf II	40	100	—	255.328	P I	80	[600]	U 3
281.6179	Al II	10	100	V 2	254.3971	Ir I	200	100	—
281.6154	Mo II	200	300	V 1	254.324	Tc II	500	1000	—
280.962	Bi I	200	100	—	253.6519	Hg I	2000 R	1000 R	U 2
280.270	Mg II	150	300	V 2	253.565	P I	—	[700]	U 2
280.206	Au I	—	200	—	253.401	P I	—	[500]	—
280.200	Pb I	250 R	100	—	253.070	Te I	—	[30]	—
280.106	Mn I	600 R	60	—	252.852	Sb I	300 R	200	—
279.8271	Mn I	800 R	80	—	252.851	Si I	400	500	U 2
279.553	Mg II	150	300	V 1	251.4112	Si I	400	400	—
279.4817	Mn I	1000 R	5	—	251.9822	Co II	40	200	—
278.052	Bi I	200	100	—	251.6881	Hf II	35	100	—
278.022	As I	75 R	75	U 5	251.6111	Si I	500	500	U 3
277.3357	Hf II	25	60	—	251.4320	Si I	300	200	—
276.967	Te I	—	30	—	251.3028	Hf II	25	70	—
276.787	Tl I	400 R	300 R	—	250.6899	Si I	300	200	U 4
275.5737	Fe II	300	100	—	250.5739	Pd II	3	30	—
275.459	Ge I	30	20	—	250.2001	Zn II	20	400	V 4
274.9324	Fe II	30	30	—	249.8784	Pd II	4	150	—
274.858	Cd II	5	200	—	249.7733	B I	500	400	U 1
273.3961	Pt I	1000	200	—	249.6778	B I	300	300	U 2
271.4674	Ta I	200	8	—	248.8921	Pd II	10	30	—
271.2409	Ru II	100	300	—	248.3272	Fe I	500 R	50	—
270.963	Ge I	30	20	—	247.8573	C I	400	[400]	U 2
270.2399	Pt I	1000	300	-	245.653	As I	100 R	8	U 4
269.4233	Ir I	150	50	—	245.011	Po I	1500	—	—
269.212	Ru II	250	400	—	243.7791	Ag II	60	500	V 2
268.511	Ta	15	25	—	242.795	Au I	400 R	100	U 1
267.8759	Ru II	300	800	—	241.3309	Fe II	60	100	V 5
267.595	Au I	250 R	100	U 2	241.0517	Fe II	50	70	V 4
267.5901	Ta II	150	200	—	240.4882	Fe II	50	100	V 3
266.9166	Al II	3	100	V 1	239.7091	W II	18	30	—
266.4786	Ir I	200	50	—	239.5625	Fe II	50	100	V 2
266.333	Po	700	—	—	238.8915	Co II	10	35	—
265.9454	Pt I	2000 R	500 R	U 2	238.576	Te I	120	[60]	U 2
265.8722	Pd II	20	300	—	238.325	Te I	100	[60]	U 3
265.3274	Ta I	200	15	—	238.2039	Fe II	40 R	100 R	V 1
265.158	Ge I	30	20	—	237.8622	Co II	25	50	—
265.118	Ge I	40	20	—	237.077	As I	50 R	3	—
265.0781	Be I	25	—	U 5	236.967	As I	40 R	20	—
264.7472	Ta I	200	10	—	236.3787	Co II	25	50	—
264.702	Tc II	300	600	—	234.984	As I	250 R	18	U 3
264.1406	Hf II	40	125	—	234.8610	Be I	2000 R	50	U 1
263.971	Ir I	100	15	—	233.5269	Ba II	60 R	100 R	—
263.593	Ta I	50	—	—	231.277	Cd II	1	200	—
263.1553	Al II	—	60	—	231.1469	Sb I	150 R	50	—
262.644	Ac II	20	5000	—	230.7857	Co II	25	50	—
261.4178	Pb I	200 R	80	—	230.4235	Ba II	60 R	80 R	—
261.000	Tc II	400	800	—	229.689	C II	—	200	—
260.5688	Mn II	100 R	500 R	V 3	228.812	As I	250 R	5	U 3
259.9396	Fe II	1000	1000	—	228.8018	Cd I	1500 R	300 R	U 1
259.805	Sb I	200	100	—	228.7084	Ni II	100	500	V 1
259.3729	Mn II	200 R	1000 R	V 2	228.6156	Co II	40	300	V 1
259.254	Ge I	20	15	—	227.6578	Bi I	100 R	40	—
258.9167	W II	15	25	—	227.0213	Ni II	100	400	V 2
257.6104	Mn II	300 R	2000 R	V 1	226.5017	Cd II	25	300	V 2

续表

λ/nm	元素	强度 电弧	强度 火花［放电管］	灵敏度①	λ/nm	元素	强度 电弧	强度 火花［放电管］	灵敏度①
226.4457	Ni II	150	400	V 3	213.856	Zn I	800 R	500	U 1
225.386	Ni II	100	300	V 4	213.5976	Cu II	25	500	V 1
224.6995	Cu II	30	500	V 3	206.833	Sb I	300 R	3	U 1
224.6412	Ag II	25	300	V 3	206.2788	Se I	—	[800]	U 3
220.353	Pb II	50	5000 R	V 1	206.238	I	—	[900]	—
219.2260	Cu II	25	500	V 2	206.191	Zn II	100	100	V 2
217.588	Sb I	300	40	U 2	206.170	Bi I	300 R	100	—
216.9994	Pb I	1000 R	1000 R	—	203.9851	Se I	—	[1000]	U 2
214.438	Cd II	50	200 R	V 1	202.551	Zn II	200	200	V 1
214.275	Te I	120	—	—					

① 表中 U1、U2、U3……表示按灵敏度递减顺序的中性原子最灵敏线；V1、V2、V3……表示按灵敏度递减顺序的离子最灵敏线。

② bh 表示光谱带头。

表 2-7 (200～180)nm 真空紫外区的元素光谱线波长[4]

λ/nm	元 素	强 度	λ/nm	元 素	强 度	λ/nm	元 素	强 度	λ/nm	元 素	强 度
200.035	Cu II	7	198.702	Ag II	20	197.088	Ge I	60	195.40	Bi	5
200.03	Fe	3	198.681	Cd II	3	197.049	Cu II	15	195.380	N II	3
200.068	Ag II	30	198.639	Si I	4	196.97	Pt I	20	195.366	N II	3
199.95	Ba	3	198.59	Ba II	1	196.89	Co I	50	195.349	Fe II	10
199.91	Mn I	9	198.573	Si I	20	196.82	Cu II		195.341	Ni II	10
199.891	Ge I	7R	198.556	Cd II	2	196.803	Ca II	5	195.323	Mn II	40
199.801	Be I	50	198.54	U	50	196.738	Ag II	10	195.243	Mn II	200
199.72	Ru	3	198.52	Sb	5	196.689	Ag II	40	195.23	Ag	9
199.65	Ir	3	198.51	Be I	3	196.688	In II	10	195.220	N II	1
199.591	Pt I	30	198.45	Te	5	196.625	Zr II	100	195.215	Sn I	150
199.589	Zr II	7	198.382	Si I	4	196.53	Se	6	195.193	Au I	25
199.58	Mn I	9	198.32	Co	4	196.53	Cd	2	195.143	N II	2
199.558	Hg II	4	198.32	Rb	4	196.523	Al II	4	195.039	Sb I	200
199.543	As I	50	198.31	Pt	8	196.470	Ca II	5	195.010	Co II	20
199.537	Hg II	6	198.19	Ni	5	196.47	Sr II	3	194.996	Hg II	30
199.543	Cd II	30	198.145	Hg II	2	196.459	Be I	40	194.981	N II	4
199.52	Sr II	5	198.12	U	50	196.434	Fe II	12	194.922	N II	6
199.488	As I	12	198.05	Ga	5	196.425	O II	0	194.92	Pt	4
199.48	Ir	3	198.000	Si I	10	196.384	O II	2	194.866	Hg II	2
199.47	Se	5	197.995	Cu II	50	196.274	Ar II	2	194.831	Ca II	5
199.435	Ag II	20	197.979	Pt I	20	196.224	O II	3	194.795	Mn II	40
199.365	C I	2	197.979	C II	3	196.201	Ge I	70	194.77	Ag	4
199.3	Se	5	197.935	C II	4	196.136	Ar II	2	194.765	Hg II	2
199.26	Ru	4	197.93	Ni	60	196.090	Se I	100	194.744	Mn II	20
199.123	Si I	5	197.891	Hg II	4	196.070	Al II	3	194.699	N II	5
199.19	Au I	6	197.857	Si I	12	196.034	O II	1	194.666	Zr II	10
199.164	N II		197.85	Pt	3	196.032	Fe II	13	194.56	Ag	3
199.159	Pt I	20	197.82	Nb IV	60	195.96	Bi	30	194.515	Mn II	25
199.113	As I	25	197.819	Au I	30	195.93	Pb IV	20	194.479	Mn II	12
199.053	Al II	20	197.794	Hg II		195.902	Th IV	200	194.473	Ge I	60
199.04	Ga	7	197.745	In II	20	195.894	Co I	15	194.459	Ca II	59
199.035	As I	100	197.703	Ag II	50	195.891	As I	10	194.46	Ag	3
198.985	Al II	80	197.70	Cd	2	195.852	Hg II	1	194.417	Mn II	15
198.98	Pt	5	197.696	Si I	15	195.783	Ar II	1	194.38	Pt	5
198.964	Co II	100	197.592	Ag II	60	195.762	Ag II	70	194.37	Be I	5
198.96	Ni	6	197.438	Co II	40	195.742	Co II	30	194.354	Cd II	100
198.94	Bi II	25	197.39	Ni	6	195.739	Hg II	1	194.33	Cd II	3
198.911	Pt I	20	197.389	Hg II	8	195.65	Ga	8	194.313	Mn II	80
198.836	Si I	30	197.378	Ar II	4	195.54	Ga	8	194.312	Ca II	20
198.827	Ge I	60	197.37	Ne II	2	195.517	Co I	40	194.265	Mn II	20
198.805	C II	1	197.348	Ar II	1	195.512	Ge I	60	194.232	Hg II	50
198.793	Hg II	6	197.32	Bi	30	195.44	Ga	8	194.2	Sn	6
198.78	Pt I	1	197.262	As I	500	195.422	Co I	30	194.128	Co II	50
198.750	Fe II	15	197.26	Xe II	5	195.42	Rb	2	194.123	Mn II	100
198.72	Hg II	10	197.09	Pt	4	195.41	Pt	4	194.108	Zr II	100

续表

λ/nm	元 素	强 度	λ/nm	元 素	强 度	λ/nm	元 素	强 度	λ/nm	元 素	强 度
194.106	Ar II	2	192.311	N II	2	190.241	Bi II	100	186.462	Mn II	15
194.10	Pd	5	192.306	Mn I	10	190.134	Si I	50	186.440	Mn II	10
194.07	Ru	5	192.301	C II	3	190.027	S I	40	186.44	N II	
194.038	Mn II	15	192.26	Sb	5	190.019	Hg II	2	186.4	Mg	40
194.020	Zr II	200	192.24	Nb IV	60	189.991	Sn II	60	186.4	Zn	50
194.014	Mn II	6	192.223	Cd II	20	189.855	Se I	80	186.35	Pb	5
193.996	P I	3	192.19	Pd II	8	189.59	Ag	4	186.282	Mn I	20
193.96	Ni I	4	192.18	Cd	3	189.546	Fe II	20	186.278	Al II	100
193.959	Cd II	20	192.164	Au II	20	189.53	Ce	3	186.257	N II	2
193.930	Al I	5	192.149	N II	4	189.498	Fe II	4	186.252	Mn II	10
193.92	Pt	6	192.125	Mn I	25	189.33	Ag	4	186.248	Al II	10
193.92	Au I	2	192.086	N II	15	189.322	Si I	25	186.234	Al II	100
193.892	Ne II	8	191.999	N II	2	189.28	Tl II	100	186.178	Co II	1000
193.832	Ge I	6	191.98	Be I	2	189.272	Si I	16	186.166	Mn II	10
193.759	As I	500	191.964	Au I	20	189.042	As I	500	186.161	Au II	10
193.749	Ge I	6	191.952	Ar II	4	188.98	Au	20	186.064	Ag II	10
193.729	Zr II	15	191.944	N II	1	188.957	Ag II	40	186.05	Ag I	8
193.696	Al II	4	191.919	Se I	60	188.952	Pt II	50	186.010	Ge I	6
193.672	Mn I	10	191.912	Co II	500	188.92	Cs	6	185.96	N II	
193.663	Zr II	15	191.90	Zn II	10	188.89	Ag	6	185.943	P I	150
193.634	Pb	20	191.893	Au I	7	188.855	P IV	80	185.922	N II	5
193.625	In II	10	191.867	Ar II	4	188.77	Si I	2	185.891	P I	150
193.583	Al II	70	191.806	Ar II	1	188.75	Ru	3	185.884	Se I	50
193.57	Ga	8	191.708	Ag II	60	188.696	Au II	7	185.85	Ag	4
193.52	Cs	8	191.692	Ag II	40	188.682	N II	4	185.847	N II	2
193.475	Al II	10	191.648	O II	2	188.61	Ar	70	185.819	Mg II	20
193.454	Al II	10	191.62	Ru	3	188.6	Mg	5	185.813	Al II	7
193.253	Ag II	5	191.616	Ne II	10	188.525	N II	20	185.805	Al II	70
193.243	Al I	5	191.556	Ar II	35	188.40	Cs	6	185.792	Mn II	20
193.19	As	10	191.510	Mn II	30	188.32	Tl	5	185.783	N II	3
193.141	Mn I	10	191.508	Fe II	15	188.27	Tl	5	185.702	Mn II	10
193.103	C II	4	191.48	Ce IV	35	188.205	Fe	20	185.670	Mn II	12
193.10	Sb	4	191.468	Mn I	12	188.20	As I	5	185.667	Cd II	200
193.0897	C I	150	191.468	S I	15R	188.170	Co II	1000	185.600	Al I	3
193.064	Mg II	60	191.465	Ar II	3	188.115	Tl II	60	185.597	Al II	8
193.052	In I	8	191.440	Ar II	40	188.105	Ce IV	18	185.58	Cd II	9
193.048	Co II	50	191.406	Fe II	19	188.036	Ag II	40	185.56	Ag	4
193.043	Ni II	20	191.40	Pd	5	187.91	Au I	30	185.55	As I	2
193.039	Fe II	15	191.379	Se I	80	187.860	N II	2	185.520	Se I	60
193.011	Ne II	8	191.37	Pb	4	187.65	Mn I	4	185.5	Na	5
193.01	Ru	3	191.362	Fe II	4	187.64	I I	70	185.490	Mn II	20
193.003	Al II	20	191.26	Sn I	15	187.58	Mn I	5	185.472	Al II	100
192.99	Ne II	2	191.22	Ag	4	187.554	Hg II	3	185.472	Ca II	20
192.987	Ge I	4R	191.19	Cu II		187.49	Ru	3	185.333	Hg II	2
192.98	Ni	5	191.140	Mn I	12	187.486	Si I	25	185.33	As I	5
192.97	Be I	3	191.091	Al II	5	187.408	Cd II	150	185.327	Mn II	25
192.97	Pd	4	190.912	N II	[illegible]	187.345	Ag II	40	185.30	Ag	4
192.94	Ir	3	190.87	Ra II	8	187.31	As I	4	185.281	Mn I	10
192.93	Pt I	3	190.864	Tl II	20	187.28	Zn	4	185.271	Co I	30
192.85	Pt	4	190.846	Mg II	3	187.27	Pt	8	185.248	Si I	25R
192.82	As	5	190.811	N II	15	187.255	Ag II	10	185.160	Mn I	15
192.774	Co II	200	190.78	Ag	4	187.242	Au	6	185.122	P I	80
192.764	Hg II	1	190.76	Sn	5	187.239	Ca II	5	185.110	Ca II	70
192.708	Sb I	200	190.756	Ne II	8	187.23	Ca II	12	185.11	Cd II	9
192.658	Mn II	15	190.744	N II	4	187.17	As I	5	185.068	Si I	50R
192.630	Fe II	18	190.73	As	5	187.115	Sb I	300	185.03	As I	6
192.556	Mn I	10	190.657	Al II	4	187.078	Hg II	1	184.957	Hg I	100R
192.530	Ag II	20	190.60	Ga	5	187.028	Ca II	6	184.95	Ba II	4
192.470	Ba II	5	190.50	Ga	5	187.028	Ca II	20	184.93	Ga	9
192.47	Au	5	190.476	Hg I	4	187.01	As I	4	184.85	Ag	5
192.387	Mg II	3	190.443	Au II	10	186.924	Hg II	10	184.827	Mn II	20
192.386	N II	2	190.438	Al II	2	186.92	Ba II	50	184.816	Mn II	10
192.340	C II	2	190.43	Mn	50	186.76	Sb	8	184.778	Mn II	10
192.334	Mn I	10	190.39	Ga	5	186.712	Ag II	35	184.747	Si I	35R
192.322	C II	2	190.35	Cd II	5	186.606	Ag II	1	184.74	As I	6

续表

λ/nm	元素	强度	λ/nm	元素	强度	λ/nm	元素	强度	λ/nm	元素	强度
184.719	P I	100	183.54	Zn II	70	182.587	B I	10	181.217	Ca II	5
184.70	Ge I	5	183.52	Pb	10	182.535	Cu I	50	181.19	Sn II	20
184.70	Sr II	3	183.482	Al I	6	182.380	Bi II	50	181.134	Sn II	80
184.640	N I	6	183.457	Mn I	25	182.370	Mn II	30	181.1	Zr	3
184.580	N II	4	183.45	P	40	182.250	Cl II	20	180.98	Mo	20
184.564	N II	5	183.431	Ag II	10	182.24	Te I	20	180.905	Si I	30
184.530	Ga II	80	183.43	Bi III	20	182.221	Mn II	10	180.829	Hg II	4
184.507	Co II	100	183.43	Zn II	3	182.21	Zn	5	180.823	Ag III	30
184.466	Cd II	100	183.348	Zn II	3	182.20	Ag	4	180.801	Si II	7
184.45	As I	3	183.33	Au I	5	182.20	Sn	8	180.791	Ca III	5
184.445	I I	500	183.285	Al II	8	182.17	Pb II	10	180.774	Ca II	70
184.39	Fe	2	183.28	U	50	182.073	Hg II	5	180.74	Se I	8
184.37	Te	5	183.268	Ni II	2	182.04	Cd	1	180.731	S I	50
184.31	Ar	90	183.233	Ag II	25	182.037	S I	50	180.62	As I	5
184.309	Ca II	60	183.19	Sn II	12	182.00	Ar	70	180.55	N III	7
184.280	B II	5	183.188	Zr II	4	181.841	B I	6	180.528	Zr III	100
184.22	Pd I	6	183.18	As I	6	181.790	B I	5	180.448	Ni II	20
184.06	Cu	3	183.14	Ar	90	181.77	Ni II	1	180.44	Ti	5
184.059	Hg I	1	183.033	I I	1000	181.694	Si II	8	180.43	N III	6
184.014	Ag II	40	182.950	Sb I	100	181.683	Mn II	10	180.300	Mn II	12
184.006	Ca I	100	182.833	Ag II	35	181.683	Ag II	25	180.23	Ga	70
183.959	N II	2	182.86	Al II	10	181.64	Cr	100	180.224	Ag II	15
183.943	Ar	9	182.825	Mn II	20	181.629	Mn II	20	180.18	Sb IV	6
183.93	Zn II	60	182.81	Mg I	30	181.524	Mn II	20	180.127	Mn II	50
183.801	Ca I	90	182.786	Tl II	60	181.497	Sb II	50	180.075	Mg II	4
183.674	N I	2	182.762	Cd II	11	181.480	Tl II	25	180.058	Au I	35
183.67	Zn II	8	182.708	Mn II	50	181.46	Ca II	80	180.004	Zr II	50
183.642	Ar II	5	182.641	B I	10	181.402	Si I	50			
183.610	Ag II	25	182.625	S I	50	181.398	Ga II	90			
183.559	N II	6	182.6	Te	50	181.386	Mn II	15			

二、光谱半定量分析

光谱半定量分析介于定性分析和定量分析之间，可以给出含量近似值。半定量分析是以谱线数目或谱线强度为依据，常用的光谱半定量分析方法有谱线强度比较法、谱线呈现法、均称线对法和加权因子法等。

1. 谱线强度比较法

将试样中某元素的谱线强度，与已知的参考强度进行比较，以确定该元素的含量。鉴于所采用的参考强度不同，比较法可分为标样光谱比较法、标准黑度比较法和内标光谱比较法。

2. 谱线呈现法

谱线呈现法是基于被测元素的谱线数目随着样品中待测元素含量的增加而增多。因此，可在固定的工作条件下，用递增标样系列摄谱，把相应的谱线，编成一个谱线呈现表。在测定时，按同样条件摄谱，利用谱线呈现表，就可以估计出试样中元素的含量。

3. 均称线对法

选用一条或数条分析线与一些内参比线组成若干个均称线组，将分析样品按确定的条件摄谱后，观察所得光谱中分析线与内参比线的黑度（或强度），找出黑度（或强度）相等的均称线对，即可确定样品中分析元素的含量。

4. 加权因子法

由于某元素的谱线强度是与蒸气云中该元素的原子浓度成正比，而后者又由试样中该元素的相对含量所决定。因此，在相同的工作条件下，某元素的谱线强度是试样中该元素相对

表 2-8 铁谱的标准波长[4]

15℃、1.01325×10^{5}Pa 大气压下的 λ/nm						
210.0795	228.7632	256.25348	296.52551	339.98343	523.2948	808.5200
210.2349	229.1122	257.57442	298.14448	340.15196	526.6564	809.6874
210.8955	229.25227	257.61033	298.72919	340.74608	537.1493	819.8951
211.0233	229.38454	258.45349	299.03923	341.31335	540.5779	820.7767
211.2966	229.44059	258.58753	299.95123	342.71207	543.4527	822.0406
211.5168	229.69247	259.83689	300.30311	344.38774	545.5613	823.2347
213.0962	229.7785	261.18725	300.95698	344.51506	549.7520	823.9130
213.2015	229.92180	261.38240	301.59129	346.58622	550.6783	824.8151
213.5957	230.01397	261.76160	302.40330	347.67035	556.9626	829.3527
213.8589	230.16818	262.16690	303.01491	348.53415	558.6763	832.7063
213.9695	230.34225	262.56663	303.73891	349.05746	561.5652	833.1941
214.1715	230.3579	262.82923	304.04281	349.78418	565.8825	833.9431
214.5188	230.89971	263.58082	304.76059	351.3821	570.9396	836.0822
214.7787	231.31022	264.39972	305.52631	355.6882	576.3013	836.5642
215.0182	232.03561	264.75576	305.74452	360.6682	585.7759Ni	838.7781
215.1099	232.73940	265.17059	305.90874	364.0392	589.2882Ni	843.9603
215.3004	233.13067	266.20563	306.72433	367.6314	602.7058	846.8413
215.4458	233.27972	267.32127	307.57204	367.7630	606.5489	851.4075
215.7792	233.80052	267.90608	308.37419	372.4381	613.7697	852.6685
216.1577	234.42802	268.92117	309.15777	375.3615	619.1563	858.2267
216.3368	235.48888	269.91060	311.66329	380.5346	623.0729	861.1807
216.3860	235.91039	270.65812	312.5653	384.3361	626.5141	862.1612
216.4547	235.9997	271.16543	313.41113	385.0820	631.8023	866.1908
216.5861	236.0294	271.4413	314.39896	386.5527	633.5338	867.4751
217.2581	236.2019	271.84352	315.70388	390.6482	639.3606	868.8633
217.3212	236.48269	272.35770	316.06582	390.7937	643.0852	875.7192
217.6837	236.6592	272.7540	317.54465	393.5816	649.4985	876.4000
218.0866	236.8595	273.5473	317.80137	397.7744	654.6245	879.3376
218.3979	237.0497	273.95467	318.48948	402.1870	659.2920	880.4624
218.6890	237.14285	274.64833	319.16583	407.6638	667.7994	882.4227
218.7192	237.4517	274.69823	319.69288	411.8549	675.0157	883.8433
219.1202	237.5193	274.9325	320.04744	413.4680	716.4469	886.6961
219.6040	237.92756	275.57366	320.53992	414.7673	718.7341	894.5204
220.07227	238.07591	276.31078	321.59398	419.1436	720.7406	897.5408
220.1117	238.4386	276.75208	321.73796	423.3609	738.9425	899.9561
220.7068	238.86270	277.82205	322.20682	428.2406	740.1689	901.2098
221.0686	238.99713	278.18347	322.57883	431.5087	741.1178	907.9599
221.1234	239.92396	279.77751	323.62226	437.5933	741.8674	908.8326
222.81704	240.4430	280.45200	323.94362	442.7313	744.5776	908.9413
223.1211	240.66593	280.69840	324.41887	446.6556	749.5088	911.8888
224.0627	241.05172	281.32861	325.43628	449.4568	751.1045	914.7800
224.5651	241.10663	282.32753	325.75937	453.1152	753.1171	921.0030
224.8858	241.33087	283.24350	327.10014	454.7851	756.8925	925.830
224.9177	243.1025	283.81193	328.02613	459.2655	758.3796	935.046
225.31251	243.81811	284.55945	328.45892	460.2945	758.6044	935.9420
225.5861	244.25674	285.17970	328.67538	464.7437	762.0538	936.2370
225.9511	244.38707	286.3864	329.81328	469.1414	766.1223	937.2900
226.0079	244.77086	286.93075	330.5971	470.7282	766.4302	943.008
226.43894	245.34746	287.41722	330.6356	473.6782	771.0390	951.324
226.5053	245.75956	287.73005	331.47421	478.9654	774.8281	956.9960
						962.6562
227.08601	246.51479	289.45050	332.37374	487.8219	778.0586	965.3143
227.1781	246.88782	289.50352	332.88669	490.3318	783.2224	973.8624
227.20670	247.48131	289.94156	333.76655	491.9001	791.2866	975.3129
227.40085	248.70643	291.21581	334.05659	500.1872	793.7166	976.3450
227.60247	249.65324	292.06906	334.79262	501.2072	794.5878	976.3913
						980.0335
227.7098	250.78987	292.90081	335.52285	504.9825	799.4473	986.1793
227.9922	251.96279	294.13430	337.07845	508.3343	799.8972	988.9082
228.3653	253.06938	295.39400	338.01111	511.0414	802.8341	1006.5080
228.4087	254.21007	295.73654	338.39808	516.7491	804.6073	1014.5601
228.72477	255.10936	295.99924	339.69772	519.2353	808.0668	1021.6351

含量的函数，可用经验式表示为

$$c_i = F_i(R_i^2)\Big/\sum_{i=1}^{n} R_i \tag{2-21}$$

式中 c_i——试样中元素 i 的相对含量；

R_i——元素 i 的特征谱线的相对强度；

$\sum_{i=1}^{n} R_i$——所有待测元素谱线相对强度的总和；

F_i——分析元素的加权因子。

在确定的条件下，某元素的某一根谱线的加权因子为一常数。通过事先对标样的试验，可以确定各个待测元素的加权因子。在分析试样时，只需测出试样光谱中各元素分析线的相对强度，利用已确定的加权因子，即可计算出各元素的相对含量。

三、光谱定量分析

光谱定量分析就是根据样品中被测元素的谱线强度来准确确定该元素的含量。

1. 光谱定量分析的基本关系式

元素的谱线强度与元素含量的关系是光谱定量分析的依据，可用如下经验式表示。

$$I = Ac^B \tag{2-22}$$

式中 I——谱线强度；

c——元素含量；

A——发射系数；

B——自吸系数。

若对(2-22)式取对数，则得

$$\lg I = B\lg c + \lg A \tag{2-23}$$

(2-23) 式即为光谱定量分析的基本关系式。以 $\lg I$ 对 $\lg c$ 作图，在一定的浓度范围内为直线。

2. 内标法光谱定量分析的原理

为了提高定量分析的准确度，通常测量谱线的相对强度。即在被分析元素中选一根谱线为分析线，在基体元素或定量加入的其他元素谱线中选一根谱线为内标线，分别测量分析线与内标线的强度，然后求出它们的比值。该比值不受实验条件变化的影响，只随试样中元素含量变化而变化。这种测量谱线相对强度的方法，称为内标法。

根据(2-23)式，分析线和内标线的强度分别为

$$\lg I = B\lg c + \lg A$$

$$\lg I_0 = B_0\lg c_0 + \lg A_0$$

因内标元素的含量 c_0 是固定的，两式相减得

$$\lg R = B\lg c + \lg A' \tag{2-24}$$

式中，$R = I/I_0$ 为线对的相对强度；$A' = \dfrac{A}{A_0 c_0^B}$ 为新的常数。

(2-24) 式是内标法定量关系式，用标样系列摄谱，可绘制 $\lg R$-$\lg c$ 校准曲线。在分析时，测得试样中线对的相对强度，即可由校准曲线查得分析元素含量。

3. 光谱定量分析方法

(1) 校准曲线法　光谱定量分析中最基本和最常用的一种方法。即采用含有已知分析物浓度的标样制作校准曲线，然后由该曲线读出分析结果。该法由于标样与试样的光谱摄于同

一感光板上，避免了光源、相板性质等一系列条件的变化给分析结果带来的系统误差，从而保证了分析的准确度。

(2) 标准加入法　在试样中加入一定量的待测元素，以求出试样中的未知含量。该法无需制备标样，可最大限度避免标样与试样组成不一致造成的光谱干扰，对微量元素的测定尤为适用。

由光谱定量公式 $R=Kc^B$ 可知，当自吸收系数 $B\approx1$ 时，$R=Kc$，设样品中原始浓度为 c_x，加入量 Δc 为 c_{K_1}，c_{K_2}、c_{K_3}……，故加入“标准”后，

$$R=I_x/I_K=Kc=K(c_x+\Delta c)=Kc_x+K\Delta c \tag{2-25}$$

以 R 对 Δc 作图，可得一直线，将其外推与 c 轴相交（$R=0$ 处），则其截距的绝对值，即为 c_x。此法仅适用于纯物质中低含量组分的测定；对高含量组分的测定，因自吸收存在，B 不等于 1，外推的结果不够准确。

(3) 浓度直读法　在光电光谱分析中，根据所测电压值的大小来确定元素的含量。在含量较低时，分析物浓度与电压的关系，可用下式表示，

$$c=\alpha+\beta V+\gamma V^2 \tag{2-26}$$

式中，c 为元素浓度；V 为积分电容器电压之读数；α、β、γ 为待定常数，可通过实验用三个标样来确定。在实际分析时，只要测出各样品中分析物的 V 值及干扰值，便可自动校准干扰，直接读出分析物的浓度，并由电传打印机自动报出分析结果。此法的主要特点是分析速度快，精密度好，自动化程度高。

4. 光谱背景的来源、影响及扣除

(1) 光谱背景的来源　炽热固体，如炽热的电极头及一些炽热固体炭颗粒发射的连续光谱、在光源中生成的双原子分子辐射的带光谱、分析线旁的散射线、感光板上的灰雾以及光学系统的杂散光等都会造成光谱背景。

(2) 光谱背景的影响　背景增加会降低谱线-背景比值，影响检出限。分析线有背景时，会使校准曲线斜率降低，并出现下部弯曲现象；内标线有背景时，会使校准曲线平移。也就是说，由于背景的存在，会改变校准曲线的形状和位置，从而影响光谱分析的准确度和灵敏度。因此，背景扣除常常是光谱定量分析中必不可少的工作。

(3) 光谱背景的扣除　谱线的总强度，指谱线强度与背景强度之和。光谱背景的扣除，就是从总强度中减去背景强度，即

$$I_a=I_{a+b}-I_b \tag{2-27}$$

式中，I_a 为纯分析线强度；I_{a+b} 为有背景存在时的分析线强度，即总强度；I_b 为背景强度。可用 (2-27) 式进行背景扣除[1]，但在实际光谱定量分析中，为简化手续，常借助光谱背景扣除表来扣除背景。目前，普遍采用的背景扣除表有 D 表和 M 表。

①D 表的使用方法　根据谱线总黑度 S_{a+b} 和背景黑度 S_b，查乳剂特性曲线，得 $\lg I_{a+b}$ 和 $\lg I_b$；再根据 $\lg(I_{a+b}/I_b)$ 的计算值，查 D 表，则 $\lg R=\lg(I_{a+b}/I_b)-D$。

②M 表的使用方法　为了便于了解 M 表的使用方法，表 2-9 列出了有关公式和查表依据等。

表 2-10 和表 2-11 为 D 表，表 2-12 为 $\Delta S/\gamma$ 与 $\lg(I_a/I_b)$ 换算表，表 2-13 为 M 表，表 2-14 为影响谱线强度的元素或化合物。

---

[1] 用谱线强度相减，不是用黑度相减来扣除背景。

表 2-9 公式及其查表依据一览表①

欲求项目	公式	查表依据	备注
$\lg R$	以背景为内标的背景扣除公式： $\lg R=M$	γ，$\Delta S\to M$	$\Delta S=S_{a+b}-S_b$
$\lg\beta$	以谱线为内标的背景全面扣除公式： $\lg\beta=M_1-M_0+\Delta S_b/\gamma$	γ，ΔS_1，ΔS_0，ΔS_b $\Delta S_1\to M_1$ $\Delta S_0\to M_0$ $\Delta S_b\to\Delta S_b/\gamma$	$\Delta S_1=S_{a_1+b_1}-S_{b_1}$ $\Delta S_0=S_{a_0+b_0}-S_{b_0}$ $\Delta S_b=S_{b_1}-S_{b_0}$
$\lg\beta_v$②	以谱线为内标的背景单一扣除公式： $\lg\beta_v=M_1-\Delta S_{0v}/\gamma$	γ，ΔS_1，ΔS_{0v} $\Delta S_1\to M_1$ $\Delta S_{0v}\to\Delta S_{0v}/\gamma$	$\Delta S_1=S_{a_1+b_1}-S_{b_1}$ $\Delta S_{0v}=S_{a_0+b_0}-S_{b_1}$

① “a” 代表谱线，“b” 代表背景，“1” 代表分析线，“0” 代表内标线，γ 为感光板的反衬度。

② ΔS_{0v}为内标线与其背景的总黑度减去分析线的背景黑度之差，$\lg\beta_v$ 为谱线相对强度的对数值。

表 2-10 光谱背景的校正值 $D(\times10^{-3})$ (一)[5]

$\lg\frac{I_{a+b}}{I_b}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.99	047	047	047	0.47	046	046	046	046	046	046
0.98	048	048	048	048	048	047	047	047	047	047
0.97	049	049	049	049	049	049	049	048	048	048
0.96	050	050	050	050	050	050	050	050	049	049
0.95	052	052	051	051	051	051	051	051	051	050
0.94	053	053	053	053	052	052	052	052	052	052
0.93	054	054	054	054	054	054	053	053	053	053
0.92	056	055	055	055	055	055	055	055	055	054
0.91	057	057	057	057	056	056	056	056	056	056
0.90	058	058	058	058	058	058	058	057	057	057
0.89	060	060	060	059	059	059	059	059	059	059
0.88	061	061	061	061	061	061	060	060	060	060
0.87	063	063	063	062	062	062	062	062	062	061
0.86	065	064	064	064	064	064	064	063	063	063
0.85	066	066	066	066	065	065	065	065	065	065
0.84	068	068	067	067	067	067	067	067	066	066
0.83	070	069	069	069	069	069	068	068	068	068
0.82	071	071	071	071	071	070	070	070	070	070
0.81	073	073	073	072	072	072	072	072	072	071
0.80	075	075	075	074	074	074	074	074	073	073
0.79	077	077	076	076	076	076	076	076	075	075
0.78	079	079	078	078	078	078	078	077	077	077
0.77	081	081	080	080	080	080	080	079	079	079
0.76	083	083	082	082	082	082	082	081	081	081
0.75	085	085	085	084	084	084	084	083	083	083
0.74	087	087	087	087	086	086	086	086	085	085
0.73	089	089	089	089	089	088	088	088	088	087
0.72	092	092	091	091	091	091	090	090	090	090
0.71	094	094	094	093	093	093	093	092	092	092
0.70	097	096	096	096	096	095	095	095	095	094
0.69	099	099	099	098	098	098	098	097	097	097
0.68	102	101	101	101	101	100	100	100	100	099
0.67	104	104	104	104	103	103	103	103	102	102
0.66	107	107	107	106	106	106	105	105	105	105
0.65	110	110	109	109	109	109	108	108	108	107
0.64	113	113	112	112	112	111	111	111	111	110
0.63	116	116	115	115	115	114	114	114	114	113
0.62	119	119	118	118	118	117	117	117	117	116
0.61	122	122	122	121	121	121	120	120	120	119
0.60	126	125	125	125	124	124	124	123	123	123
0.59	129	129	128	128	128	127	127	127	126	126
0.58	133	132	132	131	131	131	130	130	130	129
0.57	136	136	135	135	135	134	134	134	133	133
0.56	140	140	139	139	138	138	138	137	137	137
0.55	144	143	143	143	142	142	141	141	141	140

续表

$\lg \frac{I_{a+b}}{I_b}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.54	148	147	147	147	146	146	145	145	145	144
0.53	152	151	151	151	150	150	149	149	149	148
0.52	156	156	155	155	154	154	154	153	153	152
0.51	161	160	160	159	159	158	158	157	157	157
0.50	165	165	164	164	163	163	162	162	161	161
0.49	170	169	169	168	168	167	167	166	166	166
0.48	175	174	174	173	173	172	172	171	171	170
0.47	180	179	179	178	178	177	177	176	176	175
0.46	185	184	184	183	183	182	182	181	181	180
0.45	190	190	189	189	188	188	187	187	186	185
0.44	196	195	195	194	194	193	193	192	192	191
0.43	202	201	201	200	199	199	198	198	197	196
0.42	208	207	207	206	205	205	204	203	203	202
0.41	214	213	213	212	211	211	210	210	209	208
0.40	220	219	219	219	218	217	217	216	215	215
0.39	227	226	226	225	224	224	223	222	222	221
0.38	234	233	233	232	231	231	230	229	229	228
0.37	242	240	240	239	239	238	237	236	236	235
0.36	249	248	248	247	246	245	245	244	243	242
0.35	257	255	255	255	254	253	252	251	251	250
0.34	265	264	264	263	262	261	260	259	259	258
0.33	274	273	272	271	270	270	269	268	267	266
0.32	283	282	281	280	279	278	277	277	276	275
0.31	292	291	290	289	288	288	287	286	285	284
0.30	302	301	300	299	298	297	296	295	294	293
0.29	312	311	310	309	308	307	306	305	304	303
0.28	323	322	321	320	319	318	317	316	314	313
0.27	334	333	332	331	330	329	328	326	325	324
0.26	346	345	344	343	342	340	339	338	337	335
0.25	359	358	356	355	354	353	351	350	349	348
0.24	372	371	369	368	367	365	364	363	361	360
0.23	386	385	383	382	380	379	378	376	375	373
0.22	401	399	398	396	395	393	392	390	389	387
0.21	416	415	413	412	410	408	407	405	404	402
0.20	433	431	430	428	426	425	423	421	420	418
0.19	451	449	447	445	443	442	440	438	436	435
0.18	469	467	466	464	462	460	458	456	454	452
0.17	490	487	485	483	481	479	477	475	473	471
0.16	511	509	507	505	502	500	498	496	494	492
0.15	535	532	530	527	525	523	520	518	516	513
0.14	560	557	555	552	549	547	544	542	539	537
0.13	587	584	582	579	576	573	570	568	565	562
0.12	617	614	611	608	605	602	599	596	593	590
0.11	650	647	643	640	637	633	630	627	624	620
0.10	687	683	679	675	672	668	664	661	657	654
0.09	728	723	719	715	711	707	703	699	695	691
0.08	774	769	764	760	755	750	746	741	737	732
0.07	827	822	816	810	805	800	794	789	784	779
0.06	889	883	876	870	863	857	851	845	839	833
0.05	964	955	948	940	932	925	917	910	903	896
0.04	1056	1045	1035	1026	1016	1007	998	989	980	972
0.03	1176	1162	1149	1136	1123	1111	1099	1088	1077	1066
0.02	1347	1326	1306	1287	1269	1252	1236	1220	1205	1190
0.01	1643	1602	1565	1530	1499	1469	1442	1416	1391	1369
0.00	∞	2638	2338	2162	2037	1941	1863	1796	1739	1688

表 2-11　光谱背景的校正值 D（二）

$\lg \frac{I_{a+b}}{I_b}$	D	$\lg \frac{I_{a+b}}{I_b}$	D	$\lg \frac{I_{a+b}}{I_b}$	D
2.00	0.004	1.60	0.011	1.20	0.028
1.90	0.006	1.50	0.014	1.10	0.036
1.80	0.007	1.40	0.018	1.00	0.046
1.70	0.009	1.30	0.022		

表 2-12　$\Delta S/\gamma$ 与 $\lg\frac{I_a}{I_b}$ 的换算表[5]

$\frac{\Delta S}{\gamma}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.05	-0.914	-0.904	-0.896	-0.887	-0.878	-0.870	-0.861	-0.853	-0.845	-0.837
0.06	-0.829	-0.822	-0.814	-0.807	-0.799	-0.792	-0.785	-0.778	-0.771	-0.764
0.07	-0.757	-0.751	-0.744	-0.737	-0.731	-0.725	-0.718	-0.706	-0.706	-0.700
0.08	-0.694	-0.688	-0.682	-0.677	-0.671	-0.665	-0.660	-0.654	-0.649	-0.643
0.09	-0.638	-0.632	-0.627	-0.622	-0.617	-0.612	-0.607	-0.602	-0.597	-0.592
0.10	-0.587	-0.582	-0.577	-0.572	-0.568	-0.563	-0.558	-0.554	-0.549	-0.545
0.11	-0.540	-0.536	-0.531	-0.527	-0.523	-0.518	-0.514	-0.510	-0.506	-0.501
0.12	-0.497	-0.493	-0.489	-0.485	-0.481	-0.477	-0.473	-0.469	-0.465	-0.461
0.13	-0.455	-0.453	-0.450	-0.449	-0.442	-0.438	-0.434	-0.431	-0.427	-0.423
0.14	-0.420	-0.416	-0.413	-0.409	-0.405	-0.402	-0.398	-0.395	-0.391	-0.388
0.15	-0.384	-0.381	-0.378	-0.375	-0.371	-0.368	-0.364	-0.361	-0.358	-0.354
0.16	-0.351	-0.348	-0.345	-0.342	-0.338	-0.335	-0.332	-0.329	-0.326	-0.323
0.17	-0.320	-0.316	-0.313	-0.310	-0.307	-0.304	-0.301	-0.298	-0.295	-0.292
0.18	-0.289	-0.286	-0.284	-0.281	-0.278	-0.275	-0.272	-0.269	-0.266	-0.263
0.19	-0.261	-0.258	-0.255	-0.252	-0.249	-0.247	-0.244	-0.241	-0.238	-0.236
0.20	-0.233	-0.230	-0.228	-0.225	-0.222	-0.220	-0.217	-0.214	-0.212	-0.209
0.21	-0.206	-0.204	-0.201	-0.199	-0.196	-0.193	-0.191	-0.188	-0.186	-0.183
0.22	-0.181	-0.178	-0.176	-0.173	-0.171	-0.168	-0.166	-0.163	-0.161	-0.158
0.23	-0.156	-0.154	-0.151	-0.149	-0.146	-0.144	-0.142	-0.139	-0.137	-0.134
0.24	-0.132	-0.130	-0.127	-0.125	-0.123	-0.120	-0.118	-0.116	-0.113	-0.111
0.25	-0.109	-0.107	-0.104	-0.102	-0.100	-0.098	-0.095	-0.093	-0.091	-0.089
0.26	-0.086	-0.084	-0.082	-0.080	-0.078	-0.075	-0.073	-0.071	-0.069	-0.067
0.27	-0.064	-0.062	-0.060	-0.058	-0.056	-0.054	-0.052	-0.049	-0.047	-0.045
0.28	-0.043	-0.041	-0.039	-0.037	-0.035	-0.033	-0.031	-0.029	-0.026	-0.024
0.29	-0.022	-0.020	-0.018	-0.016	-0.014	-0.012	-0.010	-0.008	-0.006	-0.004
0.30	-0.002	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016
0.31	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.029	0.031	0.033	0.035
0.32	0.037	0.039	0.041	0.043	0.045	0.047	0.049	0.050	0.052	0.054
0.33	0.056	0.058	0.060	0.062	0.064	0.065	0.067	0.069	0.071	0.073
0.34	0.075	0.077	0.078	0.080	0.082	0.084	0.086	0.088	0.089	0.091
0.35	0.093	0.095	0.097	0.098	0.100	0.102	0.104	0.106	0.107	0.109
0.36	0.111	0.113	0.114	0.116	0.118	0.120	0.121	0.123	0.125	0.127
0.37	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141	0.142	0.144
0.38	0.146	0.147	0.149	0.151	0.153	0.154	0.156	0.158	0.159	0.161
0.39	0.163	0.164	0.166	0.168	0.170	0.171	0.173	0.175	0.176	0.178
0.40	0.180	0.181	0.183	0.184	0.186	0.188	0.191	0.191	0.193	0.194
0.41	0.196	0.198	0.199	0.201	0.203	0.204	0.206	0.207	0.209	0.211
0.42	0.212	0.214	0.215	0.217	0.219	0.220	0.222	0.224	0.225	0.227
0.43	0.228	0.230	0.231	0.233	0.235	0.236	0.238	0.239	0.241	0.243
0.44	0.244	0.246	0.247	0.249	0.250	0.252	0.253	0.255	0.257	0.258
0.45	0.260	0.261	0.263	0.264	0.266	0.267	0.269	0.270	0.272	0.274
0.46	0.275	0.277	0.278	0.280	0.281	0.283	0.284	0.286	0.287	0.289
0.47	0.290	0.292	0.293	0.295	0.296	0.298	0.299	0.301	0.302	0.304
0.48	0.305	0.307	0.308	0.310	0.311	0.313	0.314	0.316	0.317	0.319
0.49	0.320	0.322	0.323	0.325	0.326	0.328	0.329	0.331	0.332	0.333
0.50	0.335	0.336	0.338	0.339	0.341	0.342	0.344	0.345	0.347	0.348
0.51	0.349	0.351	0.352	0.354	0.355	0.357	0.358	0.360	0.361	0.362
0.52	0.364	0.365	0.367	0.368	0.370	0.371	0.372	0.374	0.375	0.377
0.53	0.378	0.380	0.381	0.382	0.384	0.385	0.387	0.388	0.389	0.391
0.54	0.392	0.394	0.395	0.396	0.398	0.399	0.401	0.402	0.403	0.405
0.55	0.406	0.408	0.409	0.410	0.412	0.413	0.415	0.416	0.417	0.419
0.56	0.420	0.421	0.423	0.424	0.426	0.427	0.428	0.430	0.431	0.432
0.57	0.434	0.435	0.437	0.438	0.439	0.441	0.442	0.443	0.445	0.446
0.58	0.447	0.449	0.450	0.452	0.453	0.454	0.456	0.457	0.458	0.460
0.59	0.461	0.462	0.464	0.465	0.466	0.468	0.469	0.470	0.472	0.473
0.60	0.474	0.476	0.477	0.478	0.480	0.481	0.482	0.484	0.485	0.486
0.61	0.488	0.489	0.490	0.492	0.493	0.494	0.496	0.497	0.498	0.500
0.62	0.501	0.502	0.504	0.505	0.506	0.507	0.509	0.510	0.511	0.513
0.63	0.514	0.515	0.517	0.519	0.519	0.521	0.522	0.523	0.524	0.526
0.64	0.527	0.528	0.530	0.531	0.532	0.533	0.535	0.536	0.537	0.539
0.65	0.540	0.541	0.543	0.544	0.545	0.546	0.548	0.549	0.550	0.551
0.66	0.553	0.554	0.555	0.557	0.558	0.559	0.560	0.562	0.563	0.564
0.67	0.566	0.567	0.568	0.569	0.571	0.572	0.573	0.574	0.576	0.577
0.68	0.578	0.579	0.581	0.582	0.583	0.585	0.586	0.587	0.588	0.590
0.69	0.591	0.592	0.593	0.595	0.596	0.597	0.598	0.600	0.601	0.602

续表

$\frac{\Delta S}{\gamma}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.70	0.603	0.605	0.606	0.607	0.608	0.610	0.611	0.612	0.613	0.615
0.71	0.616	0.617	0.618	0.620	0.621	0.622	0.623	0.624	0.626	0.627
0.72	0.628	0.629	0.631	0.632	0.633	0.634	0.636	0.637	0.638	0.639
0.73	0.641	0.642	0.643	0.644	0.645	0.647	0.648	0.649	0.650	0.652
0.74	0.653	0.654	0.655	0.656	0.658	0.659	0.660	0.661	0.663	0.664
0.75	0.665	0.666	0.667	0.669	0.670	0.671	0.672	0.673	0.675	0.676
0.76	0.677	0.678	0.680	0.681	0.682	0.683	0.684	0.686	0.687	0.688
0.77	0.689	0.690	0.692	0.693	0.694	0.695	0.696	0.698	0.699	0.700
0.78	0.701	0.702	0.704	0.705	0.706	0.707	0.708	0.710	0.711	0.712
0.79	0.713	0.714	0.716	0.717	0.718	0.719	0.720	0.721	0.723	0.724
0.80	0.725	0.726	0.727	0.729	0.730	0.731	0.732	0.733	0.735	0.736
0.81	0.737	0.738	0.739	0.740	0.742	0.743	0.744	0.745	0.746	0.748
0.82	0.749	0.750	0.751	0.752	0.753	0.755	0.756	0.757	0.758	0.759
0.83	0.760	0.762	0.763	0.764	0.765	0.766	0.768	0.769	0.770	0.771
0.84	0.772	0.773	0.775	0.776	0.777	0.778	0.779	0.780	0.782	0.783
0.85	0.784	0.785	0.786	0.787	0.789	0.790	0.791	0.792	0.793	0.794
0.86	0.795	0.797	0.798	0.799	0.800	0.801	0.802	0.804	0.805	0.806
0.87	0.807	0.808	0.809	0.811	0.812	0.813	0.814	0.815	0.816	0.817
0.88	0.819	0.820	0.821	0.822	0.823	0.824	0.826	0.827	0.828	0.829
0.89	0.830	0.831	0.832	0.834	0.835	0.836	0.837	0.838	0.839	0.840
0.90	0.842	0.843	0.844	0.845	0.846	0.847	0.848	0.850	0.851	0.852
0.91	0.853	0.854	0.855	0.856	0.858	0.859	0.860	0.861	0.862	0.863
0.92	0.864	0.866	0.867	0.868	0.869	0.870	0.871	0.872	0.873	0.875
0.93	0.876	0.877	0.878	0.879	0.880	0.881	0.883	0.884	0.885	0.886
0.94	0.887	0.888	0.889	0.890	0.892	0.893	0.894	0.895	0.896	0.897
0.95	0.898	0.899	0.901	0.902	0.903	0.904	0.905	0.906	0.907	0.908
0.96	0.910	0.911	0.912	0.913	0.914	0.915	0.916	0.917	0.919	0.920
0.97	0.921	0.922	0.923	0.924	0.925	0.926	0.927	0.929	0.930	0.931
0.98	0.932	0.933	0.934	0.935	0.936	0.938	0.939	0.940	0.941	0.942
0.99	0.943	0.944	0.945	0.946	0.948	0.949	0.950	0.951	0.952	0.953
1.0	0.954	0.965	0.976	0.987	0.998	1.009	1.020	1.031	1.042	1.053
1.1	1.064	1.075	1.086	1.097	1.107	1.118	1.129	1.140	1.150	1.161
1.2	1.172	1.182	1.193	1.204	1.214	1.225	1.235	1.246	1.257	1.267
1.3	1.278	1.288	1.299	1.309	1.320	1.330	1.341	1.351	1.362	1.372
1.4	1.382	1.393	1.403	1.414	1.424	1.434	1.445	1.455	1.465	1.476
1.5	1.486	1.496	1.507	1.517	1.527	1.538	1.548	1.558	1.568	1.579
1.6	1.589	1.599	1.609	1.620	1.630	1.640	1.650	1.661	1.671	1.681
1.7	1.691	1.701	1.712	1.722	1.732	1.742	1.752	1.763	1.773	1.783
1.8	1.793	1.803	1.813	1.824	1.834	1.844	1.854	1.864	1.874	1.884
1.9	1.894	1.905	1.915	1.925	1.935	1.945	1.955	1.965	1.975	1.986

表 2-13　$M(\times 10^{-3})$表[6]

$\gamma=0.80$，$a=1.25000000$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	$-\infty$	−2637	−2159	−2033	−1936	−1857	−1731	−1679	−1633	−1591
0.01	−1517	−1485	−1454	1426	1373	1350	1327	−1305	−1264	−1245
0.02	−1227	−1210	−1177	−1161	−1146	−1131	−1103	−1089	−1076	−1063
0.03	−1039	−1027	−1016	−1004	−983	−972	−962	−952	−932	−923
0.04	−914	−904	−887	−878	−870	−861	−845	−837	−829	−822
0.05	−807	−799	−792	−785	−771	−764	−757	−751	−737	−731
0.06	−725	−718	−706	−700	−694	−688	−677	−671	−665	−660
0.07	−649	−643	−638	−632	−622	−617	−612	−607	−597	−592
0.08	−587	−582	−572	−568	−563	−558	−549	−545	−540	−536
0.09	−527	−523	−518	−514	−506	−501	−497	−493	−485	−481
0.10	−477	−473	−465	−461	−457	−453	−446	−442	−438	−434
0.11	−427	−423	−420	−416	−409	−405	−402	−398	−391	−388
0.12	−384	−381	−374	−371	−368	−364	−358	−354	−351	−348
0.13	−342	−338	−335	−332	−326	−323	−320	−316	−310	−307
0.14	−304	−301	−295	−292	−289	−286	−281	−278	−275	−272
0.15	−266	−263	−261	−258	−252	−249	−247	−244	−238	−236

续表

$\gamma=0.80,\ \alpha=1.25000000$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.16	−233	−230	−225	−222	−220	−217	−212	−209	−206	−204
0.17	−199	−196	−193	−191	−186	−183	−181	−178	−173	−171
0.18	−168	−166	−161	−158	−156	−154	−149	−146	−144	−142
0.19	−137	−134	−132	−130	−125	−123	−120	−118	−113	−111
0.20	−109	−107	−102	−100	−098	−095	−091	−089	−086	−084
0.21	−080	−078	−075	−073	−069	−066	−064	−062	−058	−056
0.22	−054	−052	−047	−045	−043	−041	−037	−035	−033	−031
0.23	−026	−024	−022	−020	−016	−014	−012	−010	−006	−004
0.24	−002	000	004	006	008	010	014	016	018	020
0.25	024	026	027	029	033	035	037	039	043	045
0.26	047	049	052	054	056	058	062	064	065	067
0.27	071	073	075	077	080	082	084	086	089	091
0.28	093	095	098	100	102	104	107	109	111	113
0.29	116	118	120	121	125	127	128	130	134	135
0.30	137	139	142	144	146	147	151	153	154	156
0.31	159	161	163	164	168	170	171	173	176	178
0.32	180	181	184	186	188	189	193	194	196	198
0.33	201	203	204	206	209	211	212	214	217	219
0.34	220	222	225	227	228	230	233	235	236	238
0.35	241	243	244	246	249	250	252	253	257	258
0.36	260	261	264	266	267	269	272	274	275	277
0.37	280	281	283	284	287	289	290	292	295	296
0.38	298	299	302	304	305	307	310	311	313	314
0.39	317	319	320	322	325	326	328	329	332	333
0.40	335	336	339	341	342	344	347	348	349	351
0.41	354	355	357	358	361	362	364	365	368	370
0.42	371	372	375	377	378	380	382	384	385	387
0.43	389	391	392	394	396	398	399	401	403	405
0.44	406	408	410	412	413	415	417	419	420	421
0.45	424	426	427	428	431	432	434	435	438	439
0.46	441	442	445	446	447	449	452	453	454	456
0.47	458	460	461	462	465	466	468	469	472	473
0.48	474	476	478	480	481	482	485	486	488	489
0.49	492	493	494	496	498	500	501	502	505	506
0.50	508	509	511	513	514	515	518	519	521	522
0.51	524	526	527	528	531	532	534	535	537	539
0.52	540	541	544	545	546	548	550	552	553	554
0.53	557	558	559	561	563	564	566	567	569	571
0.54	572	573	576	577	578	580	582	583	585	586
0.55	588	590	591	592	595	596	597	598	601	602
0.56	603	605	607	608	610	611	613	615	616	617
0.57	620	621	622	623	626	627	628	629	632	633
0.58	634	636	638	639	641	642	644	645	647	648
0.59	650	652	653	654	656	658	659	660	663	664
0.60	665	666	669	670	671	672	675	676	677	678
0.61	681	682	683	684	687	688	689	690	693	694
0.62	695	696	699	700	701	702	705	706	707	708
0.63	711	712	713	714	717	718	719	720	723	724
0.64	725	726	729	730	731	732	735	736	737	738
0.65	741	742	743	744	746	748	749	750	752	753
0.66	755	756	758	759	760	762	764	765	766	768
0.67	770	771	772	773	776	777	778	779	782	783
0.68	784	785	787	789	790	791	793	794	796	797
0.69	799	800	801	802	805	806	807	808	811	812
0.70	813	814	816	818	819	820	822	823	824	825
0.71	828	829	830	831	834	835	836	837	839	840
0.72	842	843	845	846	847	848	851	852	853	854
0.73	856	858	859	860	862	863	864	866	868	869
0.74	870	871	873	875	876	877	879	880	881	883
0.75	885	886	887	888	890	892	893	894	896	897
0.76	898	899	902	903	904	905	907	909	910	911
0.77	913	914	915	916	919	920	921	922	924	925
0.78	926	927	930	931	932	933	935	936	938	939
0.79	941	942	943	944	946	948	949	950	952	953
0.80	954	955	957	959	960	961	963	964	965	967

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					$\gamma=0.80,\ \alpha=1.25000000$					
0.81	969	970	971	972	974	975	976	978	980	981
0.82	982	983	985	986	987	989	991	992	993	994
0.83	996	997	998	1000	1002	1003	1004	1005	1007	1008
0.84	1009	1011	1013	1014	1015	1016	1018	1019	1020	1022
0.85	1024	1025	1026	1027	1029	1030	1031	1032	1035	1036
0.86	1037	1038	1040	1041	1042	1043	1046	1047	1048	1049
0.87	1051	1052	1053	1054	1057	1058	1059	1060	1062	1063
0.88	1064	1065	1067	1068	1069	1071	1073	1074	1075	1076
0.89	1078	1079	1080	1081	1084	1085	1086	1087	1089	1090
0.90	1091	1092	1095	1096	1097	1098	1100	1101	1102	1103
0.91	1105	1106	1107	1109	1111	1112	1113	1114	1116	1117
0.92	1118	1119	1121	1123	1124	1125	1127	1128	1129	1130
0.93	1132	1133	1134	1135	1137	1139	1140	1141	1143	1144
0.94	1145	1146	1148	1149	1150	1151	1154	1155	1156	1157
0.95	1159	1160	1161	1162	1164	1165	1166	1167	1170	1171
0.96	1172	1173	1175	1176	1177	1178	1180	1181	1182	1183
0.97	1186	1187	1188	1189	1191	1192	1193	1194	1196	1197
0.98	1198	1199	1201	1203	1204	1205	1207	1208	1209	1210
0.99	1212	1213	1214	1215	1218	1219	1220	1221	1223	1224
1.0	1225	1239	1251	1265	1278	1291	1304	1318	1330	1344
1.1	1356	1370	1382	1396	1408	1422	1434	1448	1460	1474
1.2	1486	1499	1512	1525	1538	1551	1563	1577	1589	1602
1.3	1615	1628	1640	1654	1666	1679	1691	1705	1717	1730
1.4	1742	1755	1768	1781	1793	1806	1818	1832	1844	1857
1.5	1869	1882	1895	1908	1920	1933	1945	1958	1970	1984
1.6	1996	2009	2021	2034	2046	2059	2071	2084	2097	2110
1.7	2122	2135	2147	2160	2172	2185	2197	2210	2222	2236
1.8	2248	2261	2273	2286	2298	2311	2323	2336	2348	2361
1.9	2373	2386	2398	2411	2423	2436	2448	2462	2474	2487
2.0	2499	2512	2524	2537	2549	2562	2574	2587	2599	2612
					$\gamma=0.90,\ \alpha=1.11111111$					
0.00	−∞	−2637	−2336	−2159	−2033	−1857	−1789	−1731	−1679	−1633
0.01	−1591	−1553	−1517	−1485	−1426	−1399	−1373	−1350	−1327	−1305
0.02	−1284	−1264	−1245	−1210	−1193	−1177	−1161	−1146	−1131	−1117
0.03	−1103	−1089	−1063	−1051	−1039	−1027	−1016	−1004	−993	−983
0.04	−972	−952	−942	−932	−923	−914	−904	−896	−887	−878
0.05	−861	−853	−845	−837	−829	−822	−814	−807	−799	−785
0.06	−778	−771	−764	−757	−751	−744	−737	−731	−718	−712
0.07	−706	−700	−694	−688	−682	−677	−671	−660	−654	−649
0.08	−643	−638	−632	−627	−622	−617	−607	−602	−597	−592
0.09	−587	−582	−577	−572	−568	−558	−554	−549	−545	−540
0.10	−536	−531	−527	−523	−514	−510	−506	−501	−497	−493
0.11	−489	−485	−481	−473	−469	−465	−461	−457	−453	−450
0.12	−446	−442	−434	−431	−427	−423	−420	−416	−413	−409
0.13	−405	−398	−395	−391	−388	−384	−381	−378	−374	−371
0.14	−364	−361	−358	−354	−351	−348	−345	−342	−338	−332
0.15	−329	−326	−323	−320	−316	−313	−310	−307	−301	−298
0.16	−295	−292	−289	−286	−284	−281	−278	−272	−269	−266
0.17	−263	−261	−258	−255	−252	−249	−244	−241	−238	−236
0.18	−233	−230	−228	−225	−222	−217	−214	−212	−209	−206
0.19	−204	−201	−199	−196	−191	−188	−186	−183	−181	178
0.20	−176	−173	−171	−166	−163	−161	−158	−156	−154	−151
0.21	−149	−146	−142	−139	−137	−134	−132	−130	−127	−125
0.22	−123	−118	−116	−113	−111	−109	−107	−104	−102	−100
0.23	−095	−093	−091	−089	−086	−084	−082	−080	−078	−073
0.24	−071	−069	−066	−064	−062	−060	−058	−056	−052	−049
0.25	−047	−045	−043	−041	−039	−037	−035	−031	−029	−026
0.26	−024	−022	−020	−018	−016	−014	−010	−008	−006	−004
0.27	−002	000	002	004	006	010	012	014	016	018
0.28	020	022	024	026	029	031	033	035	037	039
0.29	041	043	045	049	050	052	054	056	058	060
0.30	062	064	067	069	071	073	075	077	078	080
0.31	082	086	088	089	091	093	095	097	098	100
0.32	104	106	107	109	111	113	114	116	118	121
0.33	123	125	127	128	130	132	134	135	139	141
0.34	142	144	146	147	149	151	153	156	158	159
0.35	161	163	164	166	168	170	173	175	176	178

续表

γ=0.90，α=1.11111111										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.36	180	181	183	184	186	189	191	193	194	196
0.37	198	199	201	203	206	207	209	211	212	214
0.38	215	217	219	222	224	225	227	228	230	231
0.39	233	235	238	239	241	243	244	246	247	249
0.40	250	253	255	257	258	260	261	263	264	266
0.41	269	270	272	274	275	277	278	280	281	284
0.42	286	287	289	290	292	293	295	296	299	301
0.43	302	304	305	307	308	310	311	314	316	317
0.44	319	320	322	323	325	326	329	331	332	333
0.45	335	336	338	339	341	344	345	347	348	349
0.46	351	352	354	355	358	360	361	362	364	365
0.47	367	368	370	372	374	375	377	378	380	381
0.48	382	384	387	388	389	391	392	394	395	396
0.49	398	401	402	403	405	406	408	409	410	412
0.50	415	416	417	419	420	421	423	424	426	428
0.51	430	431	432	434	435	437	438	439	442	443
0.52	445	446	447	449	450	452	453	456	457	458
0.53	460	461	462	464	465	466	469	470	472	473
0.54	474	476	477	478	480	482	484	485	486	488
0.55	489	490	492	493	496	497	498	500	501	502
0.56	504	505	506	509	510	511	513	514	515	517
0.57	518	519	522	523	524	526	527	528	530	531
0.58	532	535	536	537	539	540	541	543	544	545
0.59	548	549	550	552	553	554	555	557	558	561
0.60	562	563	564	566	567	568	569	571	573	574
0.61	576	577	578	580	581	582	583	586	587	588
0.62	590	591	592	593	595	596	598	600	601	602
0.63	603	605	606	607	608	611	612	613	615	616
0.64	617	618	620	621	623	625	626	627	628	629
0.65	631	632	633	636	637	638	639	641	642	643
0.66	644	645	648	649	650	652	653	654	655	656
0.67	658	660	661	663	664	665	666	667	669	670
0.68	672	674	675	676	677	678	680	681	682	684
0.69	686	687	688	689	690	692	693	694	696	698
0.70	699	700	701	702	704	705	706	708	710	711
0.71	712	713	714	716	717	718	720	721	723	724
0.72	725	726	727	729	730	732	733	735	736	737
0.73	738	739	741	742	744	745	746	748	749	750
0.74	751	752	753	756	757	758	759	760	762	763
0.75	764	765	768	769	770	771	772	773	775	776
0.76	777	779	780	782	783	784	785	786	787	789
0.77	791	792	793	794	796	797	798	799	800	802
0.78	804	805	806	807	808	809	811	812	814	815
0.79	816	818	819	820	821	822	823	825	827	828
0.80	829	830	831	832	834	835	837	838	839	840
0.81	842	843	844	845	846	848	850	851	852	953
0.82	854	855	956	858	860	861	862	863	864	866
0.83	867	868	869	871	872	873	875	876	877	878
0.84	879	880	883	884	885	886	887	888	889	890
0.85	892	894	895	896	897	898	899	901	902	903
0.86	905	906	907	909	910	911	912	913	914	916
0.87	917	919	920	921	922	923	924	925	927	928
0.88	930	931	932	933	934	935	936	939	940	941
0.89	942	943	944	945	946	948	950	951	952	953
0.90	954	955	956	957	959	961	962	963	964	965
0.91	967	968	969	970	972	973	974	975	976	978
0.92	979	980	981	983	984	985	986	987	989	990
0.93	991	992	994	995	996	997	998	1000	1001	1002
0.94	1003	1005	1006	1007	1008	1009	1011	1012	1013	1014
0.95	1016	1017	1018	1019	1020	1022	1023	1024	1025	1027
0.96	1028	1029	1030	1031	1032	1034	1035	1036	1038	1039
0.97	1040	1041	1042	1043	1045	1046	1047	1049	1050	1051
0.98	1052	1053	1054	1055	1057	1058	1060	1061	1062	1063
0.99	1064	1065	1066	1067	1068	1071	1072	1073	1074	1075
1.0	1076	1088	1100	1112	1125	1136	1148	1160	1172	1183

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=0.90$, $\alpha=1.11111111$										
1.1	1195	1207	1219	1231	1243	1255	1266	1278	1289	1301
1.2	1312	1324	1337	1348	1359	1371	1382	1394	1405	1417
1.3	1428	1441	1452	1463	1475	1486	1497	1509	1520	1531
1.4	1544	1555	1566	1578	1589	1600	1612	1623	1634	1646
1.5	1658	1669	1680	1691	1702	1714	1725	1736	1748	1760
1.6	1771	1782	1793	1804	1815	1827	1838	1850	1861	1872
1.7	1883	1895	1906	1917	1928	1939	1951	1962	1973	1985
1.8	1996	2007	2018	2029	2040	2052	2063	2074	2085	2097
1.9	2108	2119	2130	2141	2153	2164	2175	2186	2197	2208
2.0	2219	2230	2242	2254	2265	2276	2287	2298	2309	2320
$\gamma=1.00$, $\alpha=1.00000000$										
0.00	−∞	−2637	−2336	−2159	−2033	−1936	−1857	−1789	−1731	−1679
0.01	−1633	−1591	−1553	−1517	−1485	−1454	−1426	−1399	−1373	−1350
0.02	−1327	−1305	−1284	−1264	−1245	−1227	−1210	−1193	−1177	−1161
0.03	−1146	−1131	−1117	−1103	−1089	−1076	−1063	−1051	−1039	−1027
0.04	−1016	−1004	−993	−983	−972	−962	−952	−942	−932	−923
0.05	−914	−904	−896	−887	−878	−870	−861	−853	−845	−837
0.06	−829	−822	−814	−807	−799	−792	−785	−778	−771	−764
0.07	−757	−751	−744	−737	−731	−725	−718	−712	−706	−700
0.08	−694	−688	−682	−677	−671	−665	−660	−654	−649	−643
0.09	−638	−632	−627	−622	−617	−612	−607	−602	−597	−592
0.10	−587	−582	−577	−572	−568	−563	−558	−554	−549	−545
0.11	−540	−536	−531	−527	−523	−518	−514	−510	−506	−501
0.12	−497	−493	−489	−485	−481	−477	−473	−469	−465	−461
0.13	−457	−453	−450	−446	−442	−438	−434	−431	−427	−423
0.14	−420	−416	−413	−409	−405	−402	−398	−395	−391	−388
0.15	−384	−381	−378	−374	−371	−368	−364	−361	−358	−354
0.16	−351	−348	−345	−342	−338	−335	−332	−329	−326	−323
0.17	−320	−316	−313	−310	−307	−304	−301	−298	−295	−292
0.18	−289	−286	−284	−281	−278	−275	−272	−269	−266	−263
0.19	−261	−258	−255	−252	−249	−247	−244	−241	−238	−236
0.20	−233	−230	−228	−225	−222	−220	−217	−214	−212	−209
0.21	−206	−204	−201	−199	−196	−193	−191	−188	−186	−183
0.22	−181	−178	−176	−173	−171	−168	−166	−163	−161	−158
0.23	−156	−154	−151	−149	−146	−144	−142	−139	−137	−134
0.24	−132	−130	−127	−125	−123	−120	−118	−116	−113	−111
0.25	−109	−107	−104	−102	−100	−098	−095	−093	−091	−089
0.26	−086	−084	−082	−080	−078	−075	−073	−071	−069	−066
0.27	−064	062	−060	−058	−056	−054	−052	−049	−047	−045
0.28	−043	−041	−039	−037	−035	−033	−031	−029	−026	−024
0.29	−022	−020	−018	−016	−014	−012	−010	−008	−006	−004
0.30	−002	000	002	004	006	008	010	012	014	016
0.31	018	020	022	024	026	027	029	031	033	035
0.32	037	039	041	043	045	047	049	050	052	054
0.33	056	058	060	062	064	065	067	069	071	073
0.34	075	077	078	080	082	084	086	088	089	091
0.35	093	095	097	098	100	102	104	106	107	109
0.36	111	113	114	116	118	120	121	123	125	127
0.37	128	130	132	134	135	137	139	141	142	144
0.38	146	147	149	151	153	154	156	158	159	161
0.39	163	164	166	168	170	171	173	175	176	178
0.40	180	181	183	184	186	188	189	191	193	194
0.41	196	198	199	201	203	204	206	207	209	211
0.42	212	214	215	217	219	220	222	224	225	227
0.43	228	230	231	233	235	236	238	239	241	243
0.44	244	246	247	249	250	252	253	255	257	258
0.45	260	261	263	264	266	267	269	270	272	274
0.46	275	277	278	280	281	283	284	286	287	289
0.47	290	292	293	295	296	298	299	301	302	304
0.48	305	307	308	310	311	313	314	316	317	319
0.49	320	322	323	325	326	328	329	331	332	333
0.50	335	336	338	339	341	342	344	345	347	348
0.51	349	351	352	354	355	357	358	360	361	362
0.52	364	365	367	368	370	371	372	374	375	377
0.53	378	380	381	382	384	385	387	388	389	391
0.54	392	394	395	396	398	399	401	402	403	405
0.55	406	408	409	410	412	413	415	416	417	419

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=1.00$, $\alpha=1.00000000$										
0.56	420	421	423	424	426	427	428	430	431	432
0.57	434	435	437	438	439	441	442	443	445	446
0.58	447	449	450	452	453	454	456	457	458	460
0.59	461	462	464	465	466	468	469	470	472	473
0.60	474	476	477	478	480	481	482	484	485	486
0.61	488	489	490	492	493	494	496	497	498	500
0.62	501	502	504	505	506	508	509	510	511	513
0.63	514	515	517	518	519	521	522	523	524	526
0.64	527	528	530	531	532	534	535	536	537	539
0.65	540	541	543	544	545	546	548	549	550	552
0.66	553	554	555	557	558	559	561	562	563	564
0.67	566	567	568	569	571	572	573	574	576	577
0.68	578	580	581	582	583	585	586	587	588	590
0.69	591	592	593	595	596	597	598	600	601	602
0.70	603	605	606	607	608	610	611	612	613	615
0.71	616	617	618	620	621	622	623	625	626	627
0.72	628	629	631	632	633	634	636	637	638	639
0.73	641	642	643	644	645	647	648	649	650	652
0.74	653	654	655	656	658	659	660	661	663	664
0.75	665	666	667	669	670	671	672	674	675	676
0.76	677	678	680	681	682	683	684	686	687	688
0.77	689	690	692	693	694	695	696	698	699	700
0.78	701	702	704	705	706	707	708	710	711	712
0.79	713	714	716	717	718	719	720	721	723	724
0.80	725	726	727	729	730	731	732	733	735	736
0.81	737	738	739	741	742	743	744	745	746	748
0.82	749	750	751	752	753	755	756	757	758	759
0.83	760	762	763	764	765	766	768	769	770	771
0.84	772	773	775	776	777	778	779	780	782	783
0.85	784	785	786	787	789	790	791	792	793	794
0.86	796	797	798	799	800	801	802	804	805	806
0.87	807	808	809	811	812	813	814	815	816	818
0.88	819	820	821	822	823	824	825	827	828	829
0.89	830	831	832	834	835	836	837	828	839	840
0.90	842	843	844	845	846	847	848	850	851	852
0.91	853	854	855	856	858	859	860	861	862	863
0.92	864	866	867	868	869	870	871	872	873	875
0.93	876	877	878	879	880	881	883	884	885	886
0.94	887	888	889	890	892	893	894	895	896	897
0.95	898	899	901	902	903	904	905	906	907	909
0.96	910	911	912	913	914	915	916	917	919	920
0.97	921	922	923	924	925	926	927	928	930	931
0.98	932	933	934	935	936	938	939	940	941	942
0.99	943	944	945	946	948	949	950	951	952	953
1.0	954	965	976	987	998	1009	1020	1031	1042	1053
1.1	1064	1075	1086	1097	1107	1118	1129	1140	1150	1161
1.2	1172	1182	1193	1204	1214	1225	1236	1246	1257	1267
1.3	1278	1288	1299	1309	1320	1330	1341	1351	1362	1372
1.4	1382	1393	1403	1414	1424	1434	1445	1455	1465	1476
1.5	1486	1496	1507	1517	1527	1538	1548	1558	1568	1579
1.6	1589	1599	1610	1620	1630	1640	1650	1661	1671	1681
1.7	1691	1701	1712	1722	1732	1742	1752	1763	1773	1783
1.8	1793	1803	1813	1824	1834	1844	1854	1864	1874	1884
1.9	1895	1905	1915	1925	1935	1945	1955	1965	1975	1986
2.0	1996	2006	2016	2026	2036	2046	2056	2066	2076	2086
$\gamma=1.10$, $\alpha=0.90909090$										
0.00	$-\infty$	−2637	−2336	−2159	−2033	−1936	−1936	−1857	−1789	−1731
0.01	−1679	−1633	−1591	−1553	−1517	−1485	−1454	−1454	−1426	−1399
0.02	−1373	−1350	−1327	−1305	−1284	−1264	−1245	−1227	−1227	−1210
0.03	−1193	−1177	−1161	−1146	−1131	−1117	−1103	−1089	−1076	−1076
0.04	−1063	−1051	−1039	−1027	−1016	−1004	−993	−983	−972	−962
0.05	−962	−952	−942	−932	−923	−914	−904	−896	−887	−878
0.06	−870	−870	−861	−853	−845	−837	−829	−822	−814	−807
0.07	−799	−792	−792	−785	−778	−771	−764	−757	−751	−744
0.08	−737	−731	−725	−725	−718	−712	−706	−700	−694	−688
0.09	−682	−677	−671	−665	−665	−660	−654	−649	−643	−638
0.10	−632	−627	−622	−617	−612	−612	−607	−602	−597	−592

续表

$Y=1.10$, $\alpha=0.90909090$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.11	−587	−582	−577	−572	−568	−563	−563	−558	−554	−549
0.12	−545	−540	−536	−531	−527	−523	−518	−518	−514	−510
0.13	−506	−501	−497	−493	−489	−485	−481	−477	−477	−473
0.14	−469	−465	−461	−457	−453	−450	−446	−442	−438	−438
0.15	−434	−431	−427	−423	−420	−416	−413	−409	−405	−402
0.16	−402	−398	−395	−391	−388	−384	−381	−378	−374	−371
0.17	−368	−368	−364	−361	−358	−354	−351	−348	−345	−342
0.18	−338	−335	−335	−332	−329	−326	−323	−320	−316	−313
0.19	−310	−307	−304	−304	−301	−298	−295	−292	−289	−286
0.20	−284	−281	−278	−275	−275	−272	−269	−266	−263	−261
0.21	−258	−255	−252	−249	−247	−247	−244	−241	−238	−236
0.22	−233	−230	−228	−225	−222	−220	−220	−217	−214	−212
0.23	−209	−206	−204	−201	−199	−196	−193	−193	−191	−188
0.24	−186	−183	−181	−178	−176	−173	−171	−168	−168	−166
0.25	−163	−161	−158	−156	−154	−151	−149	−146	−144	−144
0.26	−142	−139	−137	−134	−132	−130	−127	−125	−123	−120
0.27	−120	−118	−116	−113	−111	−109	−107	−104	−102	−100
0.28	−098	−098	−095	−093	−091	−089	−086	−084	−082	−080
0.29	−078	−075	−075	−073	−071	−069	−066	−064	−062	−060
0.30	−058	−056	−054	−054	−052	−049	−047	−045	−043	−041
0.31	−039	−037	−035	−033	−033	−031	−029	−026	−024	−022
0.32	−020	−018	−016	−014	−012	−012	−010	−008	−006	−004
0.33	−002	000	002	004	006	008	008	010	012	014
0.34	016	018	020	022	024	026	027	027	029	031
0.35	033	035	037	039	041	043	045	047	047	049
0.36	050	052	054	056	058	060	062	064	065	065
0.37	067	069	071	073	075	077	078	080	082	084
0.38	084	086	088	089	091	093	095	097	098	100
0.39	102	102	104	106	107	109	111	113	114	116
0.40	118	120	120	121	123	125	127	128	130	132
0.41	134	135	137	137	139	141	142	144	146	147
0.42	149	151	153	154	154	156	158	159	161	163
0.43	164	166	168	170	171	171	173	175	176	178
0.44	180	181	183	184	186	188	188	189	191	193
0.45	194	196	198	199	201	203	204	204	206	207
0.46	209	211	212	214	215	217	219	220	220	222
0.47	224	225	227	228	230	231	233	235	236	236
0.48	238	239	241	243	244	246	247	249	250	252
0.49	252	253	255	257	258	260	261	263	264	266
0.50	267	267	269	270	272	274	275	277	278	280
0.51	281	283	283	284	286	287	289	290	292	293
0.52	295	296	298	298	299	301	302	304	305	307
0.53	308	310	311	313	313	314	316	317	319	320
0.54	322	323	325	326	328	328	329	331	332	333
0.55	335	336	338	339	341	342	342	344	345	347
0.56	348	349	351	352	354	355	357	357	358	360
0.57	361	362	364	365	367	368	370	371	371	372
0.58	374	376	377	378	380	381	382	384	385	385
0.59	387	388	389	391	392	394	395	396	398	399
0.60	399	401	402	403	405	406	408	409	410	412
0.61	413	413	415	416	417	419	420	421	423	424
0.62	426	427	427	428	430	431	432	434	435	437
0.63	438	439	441	441	442	443	445	446	447	449
0.64	450	452	453	454	454	456	457	458	460	461
0.65	462	464	465	466	468	468	469	470	472	473
0.66	474	476	477	478	480	481	481	482	484	485
0.67	486	488	489	490	492	493	494	494	496	497
0.68	498	500	501	502	504	505	506	508	508	509
0.69	510	511	513	514	515	517	518	519	521	521
0.70	522	523	524	526	527	528	530	531	532	534
0.71	534	535	536	537	539	540	541	543	544	545
0.72	546	546	548	549	550	552	553	554	555	557
0.73	558	559	559	561	562	563	564	566	567	568
0.74	569	571	572	572	573	574	576	577	578	580
0.75	581	582	583	585	585	586	587	588	590	591

续表

γ=1.10, α=0.90909090										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.76	592	593	595	596	597	597	598	600	601	602
0.77	603	605	606	607	608	610	610	611	612	613
0.78	615	616	617	618	620	621	622	622	623	625
0.79	626	627	628	629	631	632	633	634	634	636
0.80	637	638	639	641	642	643	644	645	647	647
0.81	648	649	650	652	653	654	655	656	658	659
0.82	659	660	661	663	664	655	666	667	669	670
0.83	671	671	672	674	675	676	677	678	680	681
0.84	682	683	683	684	686	687	688	689	690	692
0.85	693	694	695	695	696	698	699	700	701	702
0.86	704	705	706	707	707	708	710	711	712	713
0.87	714	716	717	718	719	719	720	721	723	724
0.88	725	726	727	729	730	731	731	732	733	735
0.89	736	737	738	739	741	742	743	743	744	745
0.90	746	748	749	750	751	752	753	755	755	756
0.91	757	758	759	760	762	763	764	765	766	766
0.92	768	769	770	771	772	773	775	776	777	778
0.93	778	779	780	782	783	784	785	786	787	789
0.94	790	790	791	792	793	794	796	797	798	799
0.95	800	801	801	802	804	805	806	807	808	809
0.96	811	812	813	813	814	815	816	818	819	820
0.97	821	822	823	824	924	825	827	828	829	830
0.98	831	832	834	835	836	836	837	838	839	840
0.99	842	843	844	845	846	847	847	848	850	851
1.0	852	862	872	883	893	904	914	924	934	944
1.1	954	964	974	984	994	1004	1015	1025	1035	1045
1.2	1054	1064	1074	1084	1093	1103	1113	1124	1138	1143
1.3	1153	1162	1172	1181	1191	1200	1210	1220	1230	1240
1.4	1249	1259	1268	1278	1287	1297	1306	1316	1325	1336
1.5	1345	1354	1364	1373	1382	1392	1401	1410	1420	1429
1.6	1440	1449	1458	1467	1477	1486	1495	1505	1514	1523
1.7	1533	1543	1552	1561	1570	1580	1589	1598	1608	1617
1.8	1626	1635	1645	1655	1664	1673	1682	1691	1700	1710
1.9	1719	1728	1737	1747	1757	1766	1775	1784	1793	1802
2.0	1811	1821	1830	1839	1849	1858	1867	1876	1885	1895
γ=1.20, α=0.83333333										
0.00	−∞	−2637	−2336	−2336	−2159	−2033	−1936	−1857	−1789	−1789
0.01	−1731	−1679	−1633	−1591	−1553	−1553	−1517	−1485	−1454	−1426
0.02	−1399	−1399	−1373	−1350	−1327	−1305	−1284	−1284	−1264	−1245
0.03	−1227	−1210	−1193	−1193	−1177	−1161	−1146	−1131	−1117	−1117
0.04	−1103	−1089	−1076	−1063	−1051	−1051	−1039	−1027	−1016	−1004
0.05	−993	−993	−983	−972	−962	−952	−942	−942	−932	−923
0.06	−914	−904	−896	−896	−887	−878	−870	−861	−853	−853
0.07	−845	−837	−829	−822	−814	−814	−807	−799	−792	−785
0.08	−778	−778	−771	−764	−757	−751	−744	−744	−737	−731
0.09	−725	−718	−712	−712	−706	−700	−694	−688	−682	−682
0.10	−677	−671	−665	−660	−654	−654	−649	−643	−638	−632
0.11	−627	−627	−622	−617	−612	−607	−602	−602	−597	−592
0.12	−587	−582	−577	−577	−572	−568	−563	−558	−554	−554
0.13	−549	−545	−540	−536	−531	−531	−527	−523	−518	−514
0.14	−510	−510	−506	−501	−497	−493	−489	−489	−485	−481
0.15	−477	−473	−469	−469	−465	−461	−457	−453	−450	−450
0.16	−446	−442	−438	−434	−431	−431	−427	−423	−420	−416
0.17	−413	−413	−409	−405	−402	−398	−395	−395	−391	−388
0.18	−384	−381	−378	−378	−374	−371	−368	−364	−361	−361
0.19	−358	−354	−351	−348	−345	−345	−342	−338	−335	−332
0.20	−329	−329	−326	−323	−320	−316	−313	−313	−310	−307
0.21	−304	−301	−298	−298	−295	−292	−289	−286	−284	−284
0.22	−281	−278	−275	−272	−269	−269	−266	−263	−261	−258
0.23	−255	−255	−252	−249	−247	−244	−241	−241	−238	−236
0.24	−233	−230	−228	−228	−225	−222	−220	−217	−214	−214
0.25	−212	−209	−206	−204	−201	−201	−199	−196	−193	−191
0.26	−188	−188	−186	−183	−181	−178	−176	−176	−173	−171
0.27	168	−166	−163	−163	−161	−158	−156	−154	−151	−151
0.28	−149	−146	−144	−142	−139	−139	−137	−134	−132	−130
0.29	−127	−127	−125	−123	−120	−118	−116	−116	−113	−111
0.30	−109	−107	−104	−104	−102	−100	−098	−095	−093	−093

续表

γ=1.20, α=0.83333333										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.31	−091	−089	−086	−084	−082	−082	−080	−078	075	−073
0.32	−071	−071	−069	−066	−064	−062	−060	−060	−058	−056
0.33	−054	−052	−049	−049	−047	−045	−043	−041	−039	−039
0.34	−037	−035	−033	−031	−029	−029	−026	−024	−022	−020
0.35	−018	−018	−016	−014	−012	−010	−008	−008	−006	−004
0.36	−002	000	002	002	004	006	008	010	012	012
0.37	014	016	018	020	022	022	024	026	027	029
0.38	031	031	033	035	037	039	041	041	043	045
0.39	047	049	050	050	052	054	056	058	060	060
0.40	062	064	065	067	069	069	071	073	075	077
0.41	078	078	080	082	084	086	088	088	089	091
0.42	093	095	097	097	098	100	102	104	106	106
0.43	107	109	111	113	114	114	116	118	120	121
0.44	123	123	125	127	128	130	132	132	134	135
0.45	137	139	141	141	142	144	146	147	149	149
0.46	151	153	154	156	158	158	159	161	163	164
0.47	166	166	168	170	171	173	175	175	176	178
0.48	180	181	183	183	184	186	188	189	191	191
0.49	193	194	196	198	199	199	201	203	204	206
0.50	207	207	209	211	212	214	215	215	217	219
0.51	220	222	224	224	225	227	228	230	231	231
0.52	233	235	236	238	239	239	241	243	244	246
0.53	247	247	249	250	252	253	255	255	257	258
0.54	260	261	263	263	264	266	267	269	270	270
0.55	272	274	275	277	278	278	280	281	283	284
0.56	286	286	287	289	290	292	293	293	295	296
0.57	298	299	301	301	302	304	305	307	308	308
0.58	310	311	313	314	316	316	317	319	320	322
0.59	323	323	325	326	328	329	331	331	332	333
0.60	335	336	338	338	339	341	342	344	345	345
0.61	347	348	349	351	352	352	354	355	357	358
0.62	360	360	361	362	364	365	367	367	368	370
0.63	371	372	374	374	375	377	378	380	381	381
0.64	382	384	385	387	388	388	389	391	392	394
0.65	395	395	396	398	399	401	402	402	403	405
0.66	406	408	409	409	410	412	413	415	416	416
0.67	417	419	420	421	423	423	424	426	427	428
0.68	430	430	431	432	434	435	437	437	438	439
0.69	441	442	443	443	445	446	447	449	450	450
0.70	452	453	454	456	457	457	458	460	461	462
0.71	464	464	465	466	468	469	470	470	472	473
0.72	474	476	477	477	478	480	481	482	484	484
0.73	485	486	488	489	490	490	492	493	494	496
0.74	497	497	498	500	501	502	504	504	505	506
0.75	508	509	510	510	511	513	514	515	517	517
0.76	518	519	521	522	523	523	524	526	527	528
0.77	530	530	531	532	534	535	536	536	537	539
0.78	540	541	543	543	544	545	546	548	549	549
0.79	550	552	553	554	555	555	557	558	559	561
0.80	562	562	563	564	566	567	568	568	569	571
0.81	572	573	574	574	576	577	578	580	581	581
0.82	582	583	585	586	587	587	588	590	591	592
0.83	593	593	595	596	597	598	600	600	601	602
0.84	603	605	606	606	607	608	610	611	612	612
0.85	613	615	616	617	618	618	620	621	622	623
0.86	625	625	626	627	628	629	631	631	632	633
0.87	634	636	637	637	638	639	641	642	643	643
0.88	644	645	647	648	649	649	650	652	653	654
0.89	655	655	656	658	659	660	661	661	663	664
0.90	665	666	667	667	669	670	671	672	674	674
0.91	675	676	677	678	680	680	681	682	683	684
0.92	686	686	687	688	689	690	692	692	693	694
0.93	695	696	698	698	699	700	701	702	704	704
0.94	705	706	707	708	710	710	711	712	713	714
0.95	716	716	717	718	719	720	721	721	723	724

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=1.20$，$\alpha=0.83333333$										
0.96	725	726	727	727	729	730	731	732	733	733
0.97	735	736	737	738	739	739	741	742	743	744
0.98	745	745	746	748	749	750	751	751	752	753
0.99	755	756	757	757	758	759	760	762	763	763
1.0	764	775	784	793	804	813	822	832	842	851
1.1	861	870	879	889	898	907	917	926	935	945
1.2	954	963	973	982	991	1001	1009	1018	1028	1037
1.3	1046	1055	1064	1073	1082	1091	1100	1110	1118	1127
1.4	1136	1145	1154	1163	1172	1180	1190	1198	1207	1216
1.5	1225	1233	1243	1251	1260	1269	1278	1286	1296	1304
1.6	1312	1322	1330	1339	1348	1356	1365	1374	1382	1391
1.7	1400	1408	1417	1426	1434	1443	1452	1460	1468	1478
1.8	1486	1494	1504	1512	1520	1529	1538	1546	1555	1563
1.9	1571	1581	1589	1597	1606	1615	1623	1632	1640	1648
2.0	1658	1666	1674	1683	1691	1699	1709	1717	1725	1734
$\gamma=1.80$，$\alpha=0.55555555$										
0.00	$-\infty$	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2033	−2033	−1936
0.01	−1857	−1857	−1789	−1789	−1731	−1731	−1679	−1679	−1633	−1591
0.02	−1591	−1553	−1553	−1517	−1517	−1485	−1485	−1454	−1426	−1426
0.03	−1399	−1399	−1373	−1373	−1350	−1350	−1327	−1305	−1305	−1284
0.04	−1284	−1264	−1264	−1245	−1245	−1227	−1210	−1210	−1193	−1193
0.05	−1177	−1177	−1161	−1161	−1146	−1131	−1131	−1117	−1117	−1103
0.06	−1103	−1089	−1089	−1076	−1063	−1063	−1051	−1051	−1039	−1039
0.07	−1027	−1027	−1016	−1004	−1004	−993	−993	−983	−983	−972
0.08	−972	−962	−952	−952	−942	−942	−932	−932	−923	−923
0.09	−914	−904	−904	−896	−896	−887	−887	−878	−878	−870
0.10	−861	−861	−853	−853	−845	−845	−837	−837	−829	−822
0.11	−822	−814	−814	−807	−807	−799	−799	−792	−785	−778
0.12	−778	−778	−771	−771	−764	−764	−757	−751	−751	−744
0.13	−744	−737	−737	−731	−731	−725	−718	−718	−712	−712
0.14	−706	−706	−700	−700	−694	−688	−688	−682	−682	−677
0.15	−677	−671	−671	−665	−660	−660	−654	−654	−649	−649
0.16	−643	−643	−638	−632	−632	−627	−627	−622	−622	−617
0.17	−617	−612	−607	−607	−602	−602	−597	−597	−592	−592
0.18	−587	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−568	−568	−563
0.19	−558	−558	−554	−554	−549	−549	−545	−545	−540	−536
0.20	−536	−531	−531	−527	−527	−523	−523	−518	−514	−514
0.21	−510	−510	−506	−506	−501	−501	−497	−493	−493	−489
0.22	−489	−485	−485	−481	−481	−477	−473	−473	−469	−469
0.23	−465	−465	−461	−461	−457	−453	−453	−450	−450	−446
0.24	−446	−442	−442	−438	−434	−434	−431	−431	−427	−427
0.25	−423	−423	−420	−416	−416	−413	−413	−409	−409	−405
0.26	−405	−402	−398	−398	−395	−395	−391	−391	−388	−388
0.27	−384	−381	−381	−378	−378	−374	−374	−371	−371	−368
0.28	−364	−364	−361	−361	−358	−358	−354	−354	−351	−348
0.29	−348	−345	−345	−342	−342	−338	−338	−335	−332	−332
0.30	−329	−329	−326	−326	−323	−323	−320	−316	−316	−313
0.31	−313	−310	−310	−307	−307	−304	−301	−301	−298	−298
0.32	−295	−295	−292	−292	−289	−286	−286	−284	−284	−281
0.33	−281	−278	−278	−275	−272	−272	−269	−269	−266	−266
0.34	−263	−263	−261	−258	−258	−255	−255	−252	−252	−249
0.35	−249	−247	−244	−244	−241	−241	−238	−238	−236	−236
0.36	−233	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−222	−222	−220
0.37	−217	−217	−214	−214	−212	−212	−209	−209	−206	−204
0.38	−204	−201	−201	−199	−199	−196	−196	−193	−191	−191
0.39	−188	−188	−186	−186	−183	−183	−181	−178	−178	−176
0.40	−176	−173	−173	−171	−171	−168	−166	−166	−163	−163
0.41	−161	−161	−158	−158	−156	−154	−154	−151	−151	−149
0.42	−149	−146	−146	−144	−142	−142	−139	−139	−137	−137
0.43	−134	−134	−132	−130	−130	−127	−127	−125	−125	−123
0.44	−123	−120	−118	−118	−116	−116	−113	−113	−111	−111
0.45	−109	−107	−107	−104	−104	−102	−102	−100	−100	−098
0.46	−095	−095	−093	−093	−091	−091	−089	−089	−086	−084
0.47	−084	−082	−082	−080	−080	−078	−078	−075	−073	−073
0.48	−071	−071	−069	−069	−066	−066	064	−062	−062	−060
0.49	−060	−058	−058	−056	−056	−054	−052	−052	−049	−049
0.50	−047	−047	−045	−045	−043	−041	−041	−039	−039	−037

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					$\gamma=1.80$, $\alpha=0.55555555$					
0.51	−037	−035	−035	−033	−031	−031	−029	−029	−026	−026
0.52	−024	−024	−022	−020	−020	−018	−016	−016	−015	−014
0.53	−014	−012	−010	−010	−008	−008	006	−006	−004	−004
0.54	−002	000	000	002	002	004	004	006	006	008
0.55	010	010	012	012	014	014	016	016	018	020
0.56	020	022	022	024	024	026	026	027	029	029
0.57	031	031	033	033	035	035	037	039	039	041
0.58	041	043	043	045	045	047	049	049	050	050
0.59	052	052	054	054	056	058	058	060	060	062
0.60	062	064	064	065	067	067	069	069	071	071
0.61	073	073	075	077	077	078	078	080	080	082
0.62	082	084	086	086	088	088	089	089	091	091
0.63	095	095	095	097	097	098	098	100	100	102
0.64	104	104	106	106	107	107	109	109	111	113
0.65	113	114	114	116	116	118	118	120	121	121
0.66	123	125	125	125	127	127	128	130	130	132
0.67	132	134	134	135	135	137	139	139	141	141
0.68	142	142	144	144	146	147	147	149	149	151
0.69	151	153	153	154	156	156	158	158	159	159
0.70	161	161	163	164	164	166	166	168	168	170
0.71	170	171	173	173	175	175	176	176	178	178
0.72	180	181	181	183	183	184	184	186	186	188
0.73	189	189	191	191	193	193	194	194	196	198
0.74	198	199	199	201	201	203	203	204	206	206
0.75	207	207	209	209	211	211	212	214	214	215
0.76	215	217	217	219	219	220	222	222	224	224
0.77	225	225	227	227	228	230	230	231	231	233
0.78	233	235	235	236	238	238	239	239	241	241
0.79	243	243	244	246	246	247	247	249	249	250
0.80	250	252	253	253	255	255	257	257	258	258
0.81	260	261	261	263	263	264	264	266	266	267
0.82	269	269	270	270	272	272	274	274	275	277
0.83	277	278	278	280	280	281	281	283	284	284
0.84	286	286	287	287	289	289	290	292	292	293
0.85	293	295	295	296	296	298	299	299	301	301
0.86	302	302	304	304	305	307	307	308	308	310
0.87	310	311	311	313	314	314	316	316	317	317
0.88	319	319	320	322	322	323	323	325	325	326
0.89	326	328	329	329	331	331	332	332	333	333
0.90	335	336	336	338	338	339	339	341	341	342
0.91	344	344	345	345	347	347	348	348	349	351
0.92	351	352	352	354	354	355	355	357	358	358
0.93	360	360	361	361	362	362	364	365	365	367
0.94	367	368	368	370	370	371	371	372	374	374
0.95	375	375	377	377	378	380	380	381	381	382
0.96	382	384	384	385	387	387	388	388	389	389
0.97	391	391	392	394	394	395	395	396	396	398
0.98	398	399	401	401	402	402	403	403	405	405
0.99	406	408	408	409	409	410	410	412	412	413
1.0	415	421	430	437	445	452	460	466	474	482
1.1	489	497	504	511	518	526	532	540	548	554
1.2	562	568	576	582	590	596	603	611	617	625
1.3	631	638	644	652	658	665	672	678	686	692
1.4	699	705	712	718	725	732	738	745	751	758
1.5	764	771	777	784	791	797	804	809	816	822
1.6	829	835	842	848	854	861	867	873	879	886
1.7	892	898	905	911	917	923	930	935	942	948
1.8	954	961	967	973	979	985	991	997	1003	1009
1.9	1016	1022	1028	1034	1040	1046	1052	1058	1064	1071
2.0	1076	1082	1088	1095	1100	1106	1112	1118	1125	1130
					$\gamma=1.90$, $\alpha=0.52631578$					
0.00	−∞	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2033	−2033	−1936
0.01	−1936	−1857	−1857	−1789	−1789	−1731	−1731	−1679	−1679	−1633
0.02	−1591	−1591	−1553	−1553	−1517	−1517	−1485	−1485	−1454	−1454
0.03	−1426	−1426	−1399	−1399	−1373	−1373	−1350	−1350	−1327	−1305
0.04	−1305	−1284	−1284	−1264	−1264	−1245	−1245	−1227	−1227	−1210
0.05	−1210	−1193	−1193	−1177	−1177	−1161	−1161	−1146	−1131	−1131

续表

γ=1.90，α=0.52631578										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.06	−1117	−1117	−1103	−1103	−1089	−1089	−1076	−1076	−1063	−1063
0.07	−1051	−1051	−1039	−1039	−1027	−1027	−1016	−1004	−1004	−993
0.08	−993	−983	−983	−972	−972	−962	−962	−952	−952	−942
0.09	−942	−932	−932	−923	−923	−914	−904	−904	−896	−896
0.10	−887	−887	−878	−878	−870	−870	−861	−861	−853	−853
0.11	−845	−845	−837	−837	−829	−822	−822	−814	−814	−807
0.12	−807	−799	−799	−792	−792	−785	−785	−778	−778	−771
0.13	−771	−764	−764	−757	−751	−751	−744	−744	−737	−737
0.14	−731	−731	−725	−725	−718	−718	−712	−712	−706	−706
0.15	−700	−700	−694	−688	−688	−682	−682	−677	−677	−671
0.16	−671	−665	−665	−660	−660	−654	−654	−649	−649	−643
0.17	−643	−638	−632	−632	−627	−627	−622	−622	−617	−617
0.18	−612	−612	−607	−607	−602	−602	−597	−597	−592	−592
0.19	−587	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−568	−568	−563
0.20	−563	−558	−558	−554	−554	−549	−549	−545	−545	−540
0.21	−536	−536	−531	−531	−527	−527	−523	−523	−518	−518
0.22	−514	−514	−510	−510	−506	−506	−501	−501	−497	−493
0.23	−493	−489	−489	−485	−485	−481	−481	−477	−477	−473
0.24	−473	−469	−469	−465	−465	−461	−461	−457	−453	−453
0.25	−450	−450	−446	−446	−442	−442	−438	−438	−434	−434
0.26	−431	−431	−427	−427	−423	−423	−420	−416	−416	−413
0.27	−413	−409	−409	−405	−405	−402	−402	−398	−398	−395
0.28	−395	−391	−391	−388	−388	−384	−381	−381	−378	−378
0.29	−374	−374	−371	−371	−368	−368	−364	−364	−361	−361
0.30	−358	−358	−354	−354	−351	−348	−348	−345	−345	−342
0.31	−342	−338	−338	−335	−335	−332	−332	−329	−329	−326
0.32	−326	−323	−323	−320	−316	−316	−313	−313	−310	−310
0.33	−307	−307	−304	−304	−301	−301	−298	−298	−295	−295
0.34	−292	−292	−289	−286	−286	−284	−284	−281	−281	−278
0.35	−278	−275	−275	−272	−272	−269	−269	−266	−266	−263
0.36	−263	−261	−258	−258	−255	−255	−252	−252	−249	−249
0.37	−247	−247	−244	−244	−241	−241	−238	−238	−236	−236
0.38	−238	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−222	−222	−220
0.39	−220	−217	−217	−214	−214	−212	−212	−209	−209	−206
0.40	−204	−204	−201	−201	−199	−199	−196	−196	−193	−193
0.41	−191	−191	−188	−188	−186	−186	−183	−183	−181	−178
0.42	−178	−176	−176	−173	−173	−171	−171	−168	−168	−166
0.43	−166	−163	−163	−161	−161	−158	−158	−156	−154	−154
0.44	−151	−151	−149	−149	−146	−146	−144	−144	−142	−142
0.45	−139	−139	−137	−137	−134	−134	−132	−130	−130	−127
0.46	−127	−125	−125	−123	−123	−120	−120	−118	−118	−116
0.47	−116	−113	−113	−111	−111	−109	−107	−107	−104	−104
0.48	−102	−102	−100	−100	−098	−098	−095	−095	−093	−093
0.49	−091	−091	−089	−089	−086	−084	−084	−082	−082	−080
0.50	−080	−078	−078	−075	−075	−073	−073	−071	−071	−069
0.51	−069	−066	−066	−064	−062	−062	−060	−060	−058	−058
0.52	−056	−056	−054	−054	−052	−052	−049	−049	−047	−047
0.53	−045	−045	−043	−041	−041	−039	−039	−037	−037	−035
0.54	−035	−033	−033	−031	−031	−029	−029	−026	−026	−024
0.55	−024	−022	−020	−020	−018	−018	−016	−016	−014	−014
0.56	−012	−012	−010	−010	−008	−008	−006	−006	−004	−004
0.57	−002	000	000	002	002	004	004	006	006	008
0.58	008	010	010	012	012	014	014	016	016	018
0.59	020	020	022	022	024	024	026	026	027	027
0.60	029	029	031	031	033	033	035	035	037	039
0.61	039	041	041	043	043	045	045	047	047	049
0.62	049	050	050	052	052	054	054	056	058	058
0.63	060	060	062	062	064	064	065	065	067	067
0.64	069	069	071	071	073	073	075	077	077	078
0.65	078	080	080	082	082	084	084	086	086	088
0.66	088	089	089	091	091	093	095	095	097	097
0.67	098	098	100	100	102	102	104	104	106	106
0.68	107	107	109	109	111	113	113	114	114	116
0.69	116	118	118	120	120	121	121	123	123	125
0.70	125	127	127	128	130	130	132	132	134	134

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=1.90$, $\alpha=0.52631578$										
0.71	135	135	137	137	139	139	141	141	142	142
0.72	144	144	146	147	147	149	149	151	151	153
0.73	153	154	154	156	156	158	158	159	159	161
0.74	161	163	164	164	166	166	168	168	170	170
0.75	171	171	173	173	175	175	176	176	178	178
0.76	180	181	181	183	183	184	184	186	186	188
0.77	188	189	189	191	191	193	193	194	194	196
0.78	198	198	199	199	201	201	203	203	204	204
0.79	206	206	207	207	209	209	211	211	212	214
0.80	214	215	215	217	217	219	219	220	220	222
0.81	222	224	224	225	225	227	227	228	230	230
0.82	231	231	233	233	235	235	236	236	238	238
0.83	239	239	241	241	243	243	244	246	246	247
0.84	247	249	249	250	250	252	252	253	253	255
0.85	255	257	257	258	258	260	261	261	263	263
0.86	264	264	266	266	267	267	269	269	270	270
0.87	272	272	274	274	275	277	277	278	278	280
0.88	280	281	281	283	283	284	284	286	286	287
0.89	287	289	289	290	292	292	293	293	295	295
0.90	296	296	298	298	299	299	301	301	302	302
0.91	304	304	305	307	307	308	308	310	310	311
0.92	311	313	313	314	314	316	316	317	317	319
0.93	319	320	322	322	323	323	325	325	326	326
0.94	328	328	329	329	331	331	332	332	333	333
0.95	335	336	336	338	338	339	339	341	341	342
0.96	342	344	344	345	345	347	347	348	348	349
0.97	351	351	352	352	354	354	355	355	357	357
0.98	358	358	360	360	361	361	362	362	364	365
0.99	365	367	367	368	368	370	370	371	371	372
1.0	372	381	388	395	402	410	417	424	431	439
1.1	446	453	460	468	474	481	489	496	502	509
1.2	517	523	530	536	544	550	557	563	571	577
1.3	583	590	597	603	610	617	623	629	636	643
1.4	649	655	661	669	675	681	687	694	700	706
1.5	712	719	725	731	738	744	750	756	763	769
1.6	775	780	787	793	799	805	812	818	823	829
1.7	836	842	847	854	860	866	871	878	884	889
1.8	895	902	907	913	919	925	931	936	942	949
1.9	954	960	967	972	978	983	990	995	1001	1006
2.0	1013	1018	1024	1029	1036	1041	1047	1052	1059	1064
$\gamma=2.00$, $\alpha=0.50000000$										
0.00	$-\infty$	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2033	−2033	−1936
0.01	−1936	−1857	−1857	−1789	−1789	−1731	−1731	−1679	−1679	−1633
0.02	−1633	−1591	−1591	−1553	−1553	−1517	−1517	−1485	−1485	−1454
0.03	−1454	−1426	−1426	−1399	−1399	−1373	−1373	−1350	−1350	−1327
0.04	−1327	−1305	−1305	−1284	−1284	−1264	−1264	−1245	−1245	−1227
0.05	−1227	−1210	−1210	−1193	−1193	−1177	−1177	−1161	−1161	−1146
0.06	−1146	−1131	−1131	−1117	−1117	−1103	−1103	−1089	−1089	−1076
0.07	−1076	−1063	−1063	−1051	−1051	−1039	−1039	−1027	−1027	−1016
0.08	−1016	−1004	−1004	−993	−993	−983	−983	−972	−972	−962
0.09	−962	−952	−952	−942	−942	−932	−932	−923	−923	−914
0.10	−914	−904	−904	−896	−896	−887	−887	−878	−878	−870
0.11	−870	−861	−861	−853	−853	−845	−845	−837	−837	−829
0.12	−829	−822	−822	−814	−814	−807	−807	−799	−799	−792
0.13	−792	−785	−785	−778	−778	−771	−771	−764	−764	−757
0.14	−757	−751	−751	−744	−744	−737	−737	−731	−731	−725
0.15	−725	−718	−718	−712	−712	−706	−706	−700	−700	−694
0.16	−694	−688	−688	−682	−682	−677	−677	−671	−671	−665
0.17	−665	−660	−660	−654	−654	−649	−649	−643	−643	−638
0.18	−638	−632	−632	−627	−627	−622	−622	−617	−617	−612
0.19	−612	−607	−607	−602	−602	−597	−597	−592	−592	−587
0.20	−587	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−568	−568	−563
0.21	−563	−558	−558	−554	−554	−549	−549	−545	−545	−540
0.22	−540	−536	−536	−531	−531	−527	−527	−523	−523	−518
0.23	−518	−514	−514	−510	−510	−506	−506	−501	−501	−497
0.24	−497	−493	−493	−489	−489	−485	−485	−481	−481	−477
0.25	−477	−473	−473	−469	−469	−465	−465	−461	−461	−457

续表

γ=2.00，α=0.50000000										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.26	−457	−453	453	−450	−450	−446	−446	−442	−442	438
0.27	−438	−434	−434	−431	−431	−427	−427	−423	−423	−420
0.28	−420	−416	−416	−413	−413	−409	−409	−405	−405	−402
0.29	−402	−398	−398	−395	−395	−391	−391	−388	−388	−384
0.30	−384	−381	−381	−378	−378	−374	−374	−371	−371	−368
0.31	−368	−364	−364	−361	−361	−358	−358	−354	−354	−351
0.32	−351	−348	−348	−345	−345	−342	−342	−338	−338	−335
0.33	−335	−332	−332	−329	−329	−326	−326	−323	−323	−320
0.34	−320	−316	−316	−313	−313	−310	−310	−307	−307	−304
0.35	−304	−301	−301	−298	−298	−295	−295	−292	−292	−289
0.36	−289	−286	−286	−284	−284	−281	−281	−278	−278	−275
0.37	−275	−272	−272	−269	−269	−266	−266	−263	−263	−261
0.38	−261	−258	−258	−255	−255	−252	−252	−249	−249	−247
0.39	−247	−244	−244	−241	−241	−238	−238	−236	−236	−233
0.40	−233	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−222	−222	−220
0.41	−220	−217	−217	−214	−214	−212	−212	−209	−209	−206
0.42	−206	−204	−204	−201	−201	−199	−199	−196	−196	−193
0.43	−193	−191	−191	−188	−188	−186	−186	−183	−183	−181
0.44	−181	−178	−178	−176	−176	−173	−173	−171	−171	−168
0.45	−168	−166	−166	−163	−163	−161	−161	−158	−158	−156
0.46	−156	−154	−154	−151	−151	−149	−149	−146	−146	−144
0.47	−144	−142	−142	−139	−139	−137	−137	−134	−134	−132
0.48	−132	−130	−130	−127	−127	−125	−125	−123	−123	−120
0.49	−120	−118	−118	−116	−116	−113	−113	−111	−111	−109
0.50	−109	−107	−107	−104	−104	−102	−102	−100	−100	−098
0.51	−098	−095	−095	−093	−093	−091	−091	−089	−089	−086
0.52	−086	−084	−084	−082	−082	−080	−080	−078	−078	−075
0.53	−075	−073	−073	−071	−071	−069	−069	−066	−066	−064
0.54	−064	−062	−062	−060	−060	−058	−058	−056	−056	−054
0.55	−054	−052	−052	−049	−049	−047	−047	−045	−045	−043
0.56	−043	−041	−041	−039	−039	−037	−037	−035	−035	−033
0.57	−033	−031	−031	−029	−029	−026	−026	−024	−024	−022
0.58	−022	−020	−020	−018	−018	−016	−016	−014	−014	−012
0.59	−012	−010	−010	−008	−008	−006	−006	−004	−004	−002
0.60	−002	000	000	002	002	004	004	006	006	008
0.61	008	010	010	012	012	014	014	016	016	018
0.62	018	020	020	022	022	024	024	026	026	027
0.63	027	029	029	031	031	033	033	035	035	037
0.64	037	039	039	041	041	043	043	045	045	047
0.65	047	049	049	050	050	052	052	054	054	056
0.66	056	058	058	060	060	062	062	064	064	065
0.67	065	067	067	069	069	071	071	073	073	075
0.68	075	077	077	078	078	080	080	082	082	084
0.69	084	086	086	088	088	089	089	091	091	093
0.70	093	095	095	097	097	098	098	100	100	102
0.71	102	104	104	106	106	107	107	109	109	111
0.72	111	113	113	114	114	116	116	118	118	120
0.73	120	121	121	123	123	125	125	127	127	128
0.74	128	130	130	132	132	134	134	135	135	137
0.75	137	139	139	141	141	142	142	144	144	146
0.76	146	147	147	149	149	151	151	153	153	154
0.77	154	156	156	158	158	159	159	161	161	163
0.78	163	164	164	166	166	168	168	170	170	171
0.79	171	173	173	175	175	176	178	178	178	180
0.80	180	181	181	183	183	184	184	186	186	188
0.81	188	189	189	191	191	193	193	194	194	196
0.82	196	198	198	199	199	201	201	203	203	204
0.83	204	206	206	207	207	209	209	211	211	212
0.84	212	214	214	215	215	217	217	219	219	220
0.85	220	222	222	224	224	225	225	227	227	228
0.86	228	230	230	231	231	233	233	235	235	236
0.87	236	238	238	239	239	241	241	243	243	244
0.88	244	246	246	247	247	249	249	250	250	252
0.89	252	253	253	255	255	257	257	258	258	260
0.90	260	261	261	263	263	264	264	266	266	267

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=2.00$, $\alpha=0.50000000$										
0.91	267	269	269	270	270	272	272	274	274	275
0.92	275	277	277	278	278	280	280	281	281	283
0.93	283	284	284	286	286	287	287	289	289	290
0.94	290	292	292	293	293	295	295	296	296	298
0.95	298	299	299	301	301	302	302	304	304	305
0.96	305	307	307	308	308	310	310	311	311	313
0.97	313	314	314	316	316	317	317	319	319	320
0.98	320	322	322	323	323	325	325	326	326	328
0.99	328	329	329	331	331	332	332	333	333	335
1.0	335	342	349	357	364	371	378	385	392	399
1.1	406	413	420	427	434	441	447	454	461	468
1.2	474	481	488	494	501	508	514	521	527	534
1.3	540	546	553	559	566	572	578	585	591	597
1.4	603	610	616	622	628	634	641	647	653	659
1.5	665	671	677	683	689	695	701	707	713	719
1.6	725	731	737	743	749	755	760	766	772	778
1.7	784	790	796	801	807	813	819	824	830	836
1.8	842	847	853	859	864	870	876	881	887	893
1.9	898	904	910	915	921	926	932	938	943	949
2.0	954	960	965	971	976	982	987	993	998	1004
$\gamma=2.10$, $\alpha=0.47619047$										
0.00	−∞	−2959	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2033	−2033
0.01	−1936	−1936	−1857	−1857	−1789	−1789	−1731	−1731	−1679	−1679
0.02	−1633	−1633	−1663	−1591	−1591	−1553	−1553	−1517	−1517	−1485
0.03	−1485	−1454	−1454	−1426	−1426	−1399	−1399	−1373	−1373	−1350
0.04	−1350	−1327	−1327	−1327	−1305	−1305	−1284	−1284	−1264	−1264
0.05	−1245	−1245	−1227	−1227	−1210	−1210	−1193	−1193	−1177	−1177
0.06	−1161	−1161	−1146	−1146	−1146	−1131	−1131	−1117	−1117	−1103
0.07	−1039	−1089	−1089	−1075	−1076	−1063	−1063	−1051	−1051	−1039
0.08	−1039	−1027	−1027	−1016	−1016	−1016	−1004	−1004	−993	−993
0.09	−983	−983	−972	−972	−962	−962	−952	−952	−942	−942
0.10	−932	−932	−923	−923	−914	−914	−914	−904	−904	−896
0.11	−896	−887	−887	−878	−878	−870	−870	−861	−861	−853
0.12	−853	−845	−845	−837	−837	−829	−829	−829	−822	−822
0.13	−814	−814	−807	−807	−799	−799	−792	−792	−785	−785
0.14	−778	−778	−771	−771	−764	−764	−757	−757	−757	−751
0.15	−751	−744	−744	−737	−737	−731	−731	−725	−725	−718
0.16	−718	−712	−712	−706	−706	−700	−700	−694	−694	−694
0.17	−688	−688	−682	−682	−677	−677	−671	−671	−665	−665
0.18	−660	−660	−654	−654	−649	−649	−643	−643	−638	−638
0.19	−638	−632	−632	−627	−627	−622	−622	−617	−617	−612
0.20	−612	−607	−607	−602	−602	−597	−597	−592	−592	−587
0.21	−587	−587	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−568	−568
0.22	−563	−563	−558	−558	−554	−554	−549	−549	−545	−545
0.23	−540	−540	−540	−536	−536	−531	−531	−527	−527	−523
0.24	−523	−518	−518	−514	−514	−510	−510	−506	−506	−501
0.25	−501	−497	−497	−497	−493	−493	−489	−489	−485	−485
0.26	−481	−481	−477	−477	−473	−473	−469	−469	−465	−465
0.27	−461	−461	−457	−457	−457	−453	−453	−450	−450	−446
0.28	−446	−442	−442	−438	−438	−434	−434	−431	−431	−427
0.29	−427	−423	−423	−420	−420	−420	−416	−416	−413	−413
0.30	−409	−409	−405	−405	−402	−402	−398	−398	−395	−395
0.31	−391	−391	−388	−388	−384	−384	−384	−381	−381	−378
0.32	−378	−374	−374	−371	−371	−368	−368	−364	−364	−361
0.33	−361	−358	−358	−354	−354	−351	−351	−351	−348	−348
0.34	−345	−345	−342	−342	−338	−338	−335	−335	−332	−332
0.35	−329	−329	−326	−326	−323	−323	−320	−320	−320	−316
0.36	−316	−313	−313	−310	−310	−307	−307	−304	−304	−301
0.37	−301	−298	−298	−295	−295	−292	−292	−289	−289	−289
0.38	−286	−286	−284	−284	−281	−281	−278	−278	−275	−275
0.39	−272	−272	−269	−269	−266	−266	−263	−263	−261	−261
0.40	−261	−258	−258	−255	−255	−252	−252	−249	−249	−247
0.41	−247	−244	−244	−241	−241	−238	−238	−236	−236	−233
0.42	−233	−233	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−222	−222
0.43	−220	−220	−217	−217	−214	−214	−212	−212	−209	−209
0.44	−206	−206	−206	−204	−204	−201	−201	−199	−199	−196
0.45	−196	−193	−193	−191	−191	−188	−188	−186	−186	−183

续表

$\gamma=2.10$，$a=0.47619047$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.46	−183	−181	−181	−181	−178	−178	−176	−176	−173	−173
0.47	−171	−171	−168	−168	−166	−166	−163	−163	−161	−161
0.48	−158	−158	−156	−156	−156	−154	−154	−151	−151	−149
0.49	−149	−146	−146	−144	−144	−142	−142	−139	−139	−137
0.50	−137	−134	−134	−132	−132	−132	−130	−130	−127	−127
0.51	−125	−125	−123	−123	−120	−120	−118	−118	−116	−116
0.52	−113	−113	−111	−111	−109	−109	−109	107	107	−104
0.53	−104	−102	−102	−100	−100	−098	−098	−095	−095	−093
0.54	−093	−091	−091	−089	−089	−086	−086	−086	−084	−084
0.55	−082	−082	−080	−080	−078	−078	−075	−075	−073	−073
0.56	−071	−071	−069	−069	−066	−066	−064	−064	−064	−062
0.57	−062	−060	−060	−058	−058	−056	−056	−054	−054	−052
0.58	−052	−049	−049	−047	−047	−045	−045	−043	−043	−043
0.59	−041	−041	−039	−039	−037	−037	−035	−035	−033	−033
0.60	−031	−031	−029	−029	−026	−026	−024	−024	−022	−022
0.61	−022	−020	−020	−018	−018	−016	−016	−014	−014	−012
0.62	−012	−010	−010	−008	−008	−006	−006	−004	−004	−002
0.63	−002	−002	000	000	002	002	004	004	006	006
0.64	008	008	010	010	012	012	014	014	016	016
0.65	018	018	018	020	020	022	022	024	024	026
0.66	026	027	027	029	029	031	031	033	033	035
0.67	035	037	037	037	039	039	041	041	043	043
0.68	045	045	047	047	049	049	050	050	052	052
0.69	054	054	056	056	056	058	058	060	060	062
0.70	062	064	064	065	065	067	067	069	069	071
0.71	071	073	073	075	075	075	077	077	078	078
0.72	080	080	082	082	084	084	086	086	088	088
0.73	089	089	091	091	093	093	093	095	095	097
0.74	097	098	098	100	100	102	102	104	104	106
0.75	106	107	107	109	109	111	111	111	113	113
0.76	114	114	116	116	118	118	120	120	121	121
0.77	123	123	125	125	127	127	128	128	128	130
0.78	130	132	132	134	134	135	135	137	137	139
0.79	139	141	141	142	142	144	144	146	146	146
0.80	147	147	149	149	151	151	153	153	154	154
0.81	156	156	158	158	159	159	161	161	163	163
0.82	163	164	164	166	166	168	168	170	170	171
0.83	171	173	173	175	175	176	176	178	178	180
0.84	180	180	181	181	183	183	184	184	186	186
0.85	188	188	189	189	191	191	193	193	194	194
0.86	196	196	196	198	198	199	199	201	201	203
0.87	203	204	204	206	206	207	207	209	209	211
0.88	211	212	212	212	214	214	215	215	217	217
0.89	219	219	220	220	222	222	224	224	225	225
0.90	227	227	228	228	228	230	230	231	231	233
0.91	233	235	235	236	236	238	238	239	239	241
0.92	241	243	243	244	244	244	246	246	247	247
0.93	249	249	250	250	252	252	253	253	255	255
0.94	257	257	258	258	260	260	260	261	261	263
0.95	263	264	264	266	266	267	267	269	269	270
0.96	270	272	272	274	274	275	275	275	277	277
0.97	278	278	280	280	281	281	283	283	284	284
0.98	286	286	287	287	289	289	290	290	290	292
0.99	292	293	293	295	295	296	296	298	298	299
1.0	299	307	314	320	328	335	342	349	355	362
1.1	370	377	382	389	396	403	409	416	423	430
1.2	435	442	449	456	461	468	474	481	488	493
1.3	500	506	513	518	524	531	537	543	549	555
1.4	562	567	573	580	586	591	597	603	610	616
1.5	621	627	633	639	644	650	656	663	667	674
1.6	680	686	690	696	702	708	713	719	725	731
1.7	737	742	748	753	759	764	770	776	782	786
1.8	792	798	804	808	814	820	825	830	836	842
1.9	847	853	858	863	869	875	879	885	890	896
2.0	901	906	912	917	922	927	933	939	943	949

续表

$\gamma=2.20$, $\alpha=0.45454545$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	−∞	−2979	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2033	−2033
0.01	−1936	−1936	−1936	−1857	−1857	−1789	−1789	−1731	−1731	−1679
0.02	−1679	−1633	−1633	−1633	−1591	−1591	−1553	−1553	−1517	−1517
0.03	−1485	−1485	−1454	−1454	−1454	−1426	−1426	−1399	−1399	−1373
0.04	−1373	−1305	−1305	−1327	−1327	−1327	−1305	−1305	−1284	−1284
0.05	−1264	−1264	−1245	−1245	−1227	−1227	−1227	−1210	−1210	−1193
0.06	−1193	−1177	−1177	−1161	−1161	−1146	−1146	−1146	−1131	−1131
0.07	−1117	−1117	−1103	−1103	−1089	−1089	−1076	−1076	−1076	−1063
0.08	−1063	−1051	−1051	−1039	−1039	−1027	−1027	−1016	−1016	−1016
0.09	−1004	−1004	−993	−993	−983	−983	−972	−972	−962	−962
0.10	−962	−952	−952	−942	−942	−932	−932	−923	−923	−914
0.11	−914	−914	−904	−904	−896	−896	−887	−887	−878	−878
0.12	−870	−870	−870	861	861	−853	−853	−845	−845	−837
0.13	−837	−829	−829	−829	−822	−822	−814	−814	−807	−807
0.14	−799	−799	−792	−792	−792	−785	−785	−778	−778	−771
0.15	−771	−764	−764	−757	−757	−757	−751	−751	−744	−744
0.16	−737	−737	−731	−731	−725	−725	−725	−718	−718	−712
0.17	−712	−706	−706	−700	−700	−694	−694	−694	−688	−688
0.18	−682	−682	−677	−677	−671	−671	−665	−665	−665	−660
0.19	−660	−654	−654	−649	−649	−643	−643	−638	−638	−638
0.20	−632	−632	−627	−627	−622	−622	−617	−617	−612	−612
0.21	−612	−607	−607	−602	−602	−597	−597	−592	−592	−587
0.22	−587	−587	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−568	−568
0.23	−563	−563	−563	−558	−558	−554	−554	−549	−549	−545
0.24	−545	−540	−540	−540	−536	−536	−531	−531	−527	−527
0.25	−523	−523	−518	−518	−518	−514	−514	−510	−510	−506
0.26	−506	−501	−501	−497	−497	−497	−493	−493	−489	−489
0.27	−485	−485	−481	−481	−477	−477	−477	−473	−473	−469
0.28	−469	−465	−465	−461	−461	−457	−457	−457	−453	−453
0.29	−450	−450	−446	−446	−442	−442	−438	−438	−438	−434
0.30	−434	−431	−431	−427	−427	−423	−423	−420	−420	−420
0.31	−416	−416	−413	−413	−409	−409	−405	−405	−402	−402
0.32	−402	−398	−398	−395	−395	−391	−391	−388	−388	−384
0.33	−384	−384	−381	−381	−378	−378	−374	−374	−371	−371
0.34	−368	−368	−368	−364	−364	−361	−361	−358	−358	−354
0.35	−354	−351	−351	−351	−348	−348	−345	−345	−342	−342
0.36	−338	−338	−335	−335	−335	−332	−332	−329	−329	−326
0.37	−326	−323	−323	−320	−320	−320	−316	−316	−313	313
0.38	−310	−310	−307	−307	−304	−304	−304	−301	−301	−298
0.39	−298	−295	−295	−292	−292	−289	−289	−289	−286	−286
0.40	−284	−284	−281	−281	−278	−278	−275	−275	−275	−272
0.41	−272	−269	−269	−266	−266	−263	−263	−261	−261	−261
0.42	−258	−258	−255	−255	−252	−252	−249	−249	−247	−247
0.43	−247	−244	−244	−241	−241	−238	−238	−236	−236	−233
0.44	−233	−233	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−222	−222
0.45	−220	−220	−220	−217	−217	−214	−214	−212	−212	−209
0.46	−209	−206	−206	−206	−204	−204	−201	−201	−199	−199
0.47	−196	−196	−193	−193	−193	−191	−191	−188	−188	−186
0.48	−186	−183	−183	−181	−181	−181	−178	−178	−176	−176
0.49	−173	−173	−171	−171	−168	−168	−168	−166	−166	−163
0.50	−163	161	−161	−158	−158	−156	−156	−156	−154	−154
0.51	−151	−151	−149	−149	−146	−146	−144	−144	−144	−142
0.52	−142	−139	−139	−137	−137	−134	−134	−132	−132	−132
0.53	−130	−130	−127	−127	−125	−125	−123	−123	−120	−120
0.54	−120	−118	−118	−116	−116	−113	−113	−111	−111	−109
0.55	−109	−109	−107	−107	−104	−104	−102	−102	−100	−100
0.56	−098	−098	−098	−095	−095	−093	−093	−091	−091	−089
0.57	−089	−086	−086	−086	−084	−084	−082	−082	−080	−080
0.58	−078	−078	−075	−075	−075	−073	−073	−071	−071	−069
0.59	−069	−066	−066	−064	−064	−064	−062	−062	−060	−060
0.60	−058	−058	−056	−056	−054	−054	−054	−052	−052	−049
0.61	−049	−047	−047	−045	−045	−043	−043	−043	−041	−041
0.62	−039	−039	−037	−037	−035	−035	−033	−033	−033	−031
0.63	−031	−029	−029	−026	−026	−024	−024	−022	−022	−022
0.64	−020	−020	−018	−018	−016	−016	−014	−014	−012	−012
0.65	−012	−010	−010	−008	−008	−006	−006	−004	−004	−002

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=2.20$，$\alpha=0.45454545$										
0.66	−002	−002	000	000	002	002	004	004	006	006
0.67	008	008	008	010	010	012	012	014	014	016
0.68	016	018	018	018	020	020	022	022	024	024
0.69	026	026	027	027	027	029	029	031	031	033
0.70	033	035	035	037	037	037	039	039	041	041
0.71	043	043	045	045	047	047	047	049	049	050
0.72	050	052	052	054	054	056	056	056	058	058
0.73	060	060	062	062	064	064	065	065	065	067
0.74	067	069	069	071	071	073	073	075	075	075
0.75	077	077	078	078	080	080	082	082	084	084
0.76	084	086	086	088	088	089	089	091	091	093
0.77	093	093	095	095	097	097	098	098	100	100
0.78	102	102	102	104	104	106	106	107	107	109
0.79	109	111	111	111	113	113	114	114	116	116
0.80	118	118	120	120	120	121	121	123	123	125
0.81	125	127	127	128	128	128	130	130	132	132
0.82	134	134	135	135	137	137	137	139	139	141
0.83	141	142	142	144	144	146	146	146	147	147
0.84	149	149	151	151	153	153	154	154	154	156
0.85	156	158	158	159	159	161	161	163	163	163
0.86	164	164	166	166	168	168	170	170	171	171
0.87	171	173	173	175	175	176	176	178	178	180
0.88	180	180	181	181	183	183	184	184	186	186
0.89	188	188	188	189	189	191	191	193	193	194
0.90	194	196	196	196	198	198	199	199	201	201
0.91	203	203	204	204	204	206	206	207	207	209
0.92	209	211	211	212	212	212	214	214	215	215
0.93	217	217	219	219	220	220	220	222	222	224
0.94	224	225	225	227	227	228	228	228	230	230
0.95	231	231	233	233	235	235	236	236	236	238
0.96	238	239	239	241	241	243	243	244	244	244
0.97	246	246	247	247	249	249	250	250	252	252
0.98	252	253	253	255	255	257	257	258	258	260
0.99	260	260	261	261	263	263	264	264	266	266
1.0	267	274	281	287	295	301	308	314	322	328
1.1	335	342	348	355	361	368	374	381	387	394
1.2	399	406	413	419	426	431	438	443	450	456
1.3	462	468	474	481	486	493	498	505	510	517
1.4	522	528	534	540	546	552	558	563	569	574
1.5	581	586	592	597	603	610	615	621	626	632
1.6	637	643	648	654	659	665	671	676	682	687
1.7	693	698	704	708	714	719	725	731	736	742
1.8	746	752	757	763	768	773	778	784	790	794
1.9	800	805	811	815	821	825	831	836	842	847
2.0	852	858	862	868	872	878	883	888	893	898
$\gamma=2.30$，$\alpha=0.43478260$										
0.00	−∞	−3000	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2159	−2033
0.01	−2033	−1936	−1936	−1857	−1857	−1789	−1789	−1789	−1731	−1731
0.02	−1679	−1679	−1633	−1633	−1633	−1591	−1591	−1553	−1553	−1517
0.03	−1517	−1517	−1485	−1485	−1454	−1454	−1426	−1426	−1399	−1399
0.04	−1399	−1373	−1373	−1350	−1350	−1327	−1327	−1327	−1305	−1305
0.05	−1284	−1284	−1264	−1264	−1264	−1245	−1245	−1227	−1227	−1210
0.06	−1210	−1193	−1193	−1193	−1177	−1177	−1161	−1161	−1146	−1146
0.07	−1146	−1131	−1131	−1117	−1117	−1103	−1103	−1103	−1089	−1089
0.08	−1076	−1076	−1063	−1063	−1051	−1051	−1051	−1039	−1039	−1027
0.09	−1027	−1016	−1016	−1016	−1004	−1004	−993	−993	−983	−983
0.10	−983	−972	−972	−962	−962	−952	−952	−942	−942	−942
0.11	−932	−932	−923	−923	−914	−914	−914	−904	−904	−896
0.12	−896	−887	−887	−887	−878	−878	−870	−870	−861	−861
0.13	−853	−853	−853	−845	−845	−837	−837	−929	−929	−929
0.14	−822	−822	−814	−814	−807	−807	−807	−799	−799	−792
0.15	−792	−785	−785	−778	−778	−778	−771	−771	−764	−764
0.16	−757	−757	−757	−751	−751	−744	−744	−737	−737	−737
0.17	−731	−731	−725	−725	−718	−718	−712	−712	−712	−706
0.18	−706	−700	−700	−694	−694	−694	−688	−688	−682	−682
0.19	−677	−677	−677	−671	−671	−665	−665	−660	−660	−654
0.20	−654	−654	−649	−649	−643	−643	−638	−638	−638	−632

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\gamma=2.30$，$\alpha=0.43478260$									
0.21	−632	−627	−627	−622	−622	−622	−617	−617	−612	−612
0.22	−607	−607	−602	−602	−602	−597	−597	−592	−592	−587
0.23	−587	−587	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−572	−568
0.24	−568	−563	−563	−558	−558	−554	−554	−554	−549	−549
0.25	−545	−545	−540	−540	−540	−536	−536	−531	−531	−527
0.26	−527	−527	−523	−523	−518	−518	−514	−514	−510	−510
0.27	−510	−506	−506	−501	−501	−497	−497	−497	−493	−493
0.28	−489	−489	−485	−485	−485	−481	−481	−477	−477	−473
0.29	−473	−469	−469	−469	−465	−465	−461	−461	−457	−457
0.30	−457	−453	−453	−450	−450	−446	−446	−446	−442	−442
0.31	−438	−438	−434	−434	−431	−431	−431	−427	−427	−423
0.32	−423	−420	−420	−420	−416	−416	−413	−413	−409	−409
0.33	−409	−405	−405	−402	−402	−398	−398	−395	−395	−395
0.34	−391	−391	−388	−388	−384	384	384	−381	−381	−378
0.35	−378	−374	−374	−374	−371	−371	−368	−368	−364	−364
0.36	−361	−361	−361	−358	−358	−354	−354	−351	−351	−351
0.37	−348	−348	−345	−345	−342	−342	−342	−338	−338	−335
0.38	−335	−332	−332	−329	−329	−329	−326	−326	−323	−323
0.39	−320	−320	−320	−316	−316	−313	−313	−310	−310	−310
0.40	−307	−307	−304	−304	−301	−301	−298	−298	−298	−295
0.41	−295	−292	−292	−289	−289	−289	−286	−286	−284	−284
0.42	−281	−281	−281	−278	−278	−275	−275	−272	−272	−269
0.43	−269	−269	−266	−266	−263	−263	−261	−261	−261	−258
0.44	−258	−255	−255	−252	−252	−252	−249	−249	−247	−247
0.45	−244	−244	−241	−241	−241	−238	−238	−236	−236	−233
0.46	−233	−233	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−225	−222
0.47	−222	−220	−220	−217	−217	−214	−214	−214	−212	−212
0.48	−209	−209	−206	−206	−206	−204	−204	−201	−201	−199
0.49	−199	−199	−196	−196	−193	−193	−191	−191	−188	−188
0.50	−188	−186	−186	−183	−183	−181	−181	−181	−178	−178
0.51	−176	−176	−173	−173	−173	−171	−171	−168	−168	−166
0.52	−166	−163	−163	−163	−161	−161	−158	−158	−156	−156
0.53	−156	−154	−154	−151	−151	−149	−149	−149	−146	−146
0.54	−144	−144	−142	−142	−139	−139	−139	−137	−137	−134
0.55	−134	−132	−132	−132	−130	−130	−127	−127	−125	−125
0.56	−125	−123	−123	−120	−120	−118	−118	−116	−116	−116
0.57	−113	−113	−111	−111	−109	−109	−109	−107	−107	−104
0.58	−104	−102	−102	−102	−100	−100	−098	−098	095	−095
0.59	−093	−093	−093	−091	−091	−089	−089	−086	−086	−086
0.60	−084	−084	−082	−082	−080	−080	−080	−078	−078	−075
0.61	−075	−073	−073	−071	−071	−071	−069	−069	−066	−066
0.62	−064	−064	−064	−062	−062	−060	−060	−058	−058	−058
0.63	−056	−056	−054	−054	−052	−052	−049	−049	−049	−047
0.64	−047	−045	−045	−043	−043	−043	−041	−041	−039	−039
0.65	−037	−037	−037	−035	−035	−033	−033	−031	−031	−029
0.66	−029	−029	−026	−026	−024	−024	−022	−022	−022	−020
0.67	−020	−018	−018	−016	−016	−016	−014	−014	−012	−012
0.68	−010	−010	−008	−008	−008	−006	−006	−004	−004	−002
0.69	−002	−002	000	000	002	002	004	004	004	006
0.70	006	008	008	010	010	012	012	012	014	014
0.71	016	016	018	018	018	020	020	022	022	024
0.72	024	024	026	026	027	027	029	029	031	031
0.73	031	033	033	035	035	037	037	037	039	039
0.74	041	041	043	043	043	045	045	047	047	049
0.75	049	050	050	050	052	052	054	054	056	056
0.76	056	058	058	060	060	062	062	062	064	064
0.77	065	065	067	067	067	069	069	071	071	073
0.78	073	075	075	075	077	077	078	078	080	080
0.79	080	082	082	084	084	086	086	088	088	088
0.80	089	089	091	091	093	093	093	095	095	097
0.81	097	098	098	098	100	100	102	102	104	104
0.82	106	106	106	107	107	109	109	111	111	111
0.83	113	113	114	114	116	116	116	118	118	120
0.84	120	121	121	123	123	123	125	125	127	127
0.85	128	128	128	130	130	132	132	134	134	134

续表

$\gamma=2.30$，$\alpha=0.43478260$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.86	135	135	137	137	139	139	141	141	141	142
0.87	142	144	144	146	146	146	147	147	149	149
0.88	151	151	151	153	153	154	154	156	156	158
0.89	158	158	159	159	161	161	163	163	163	164
0.90	164	166	166	168	168	168	170	170	171	171
0.91	173	173	175	175	175	176	176	178	178	180
0.92	180	180	181	181	183	183	184	184	184	186
0.93	186	188	188	189	189	191	191	191	193	193
0.94	194	194	196	196	196	198	198	199	199	201
0.95	201	201	203	203	204	204	206	206	207	207
0.96	207	209	209	211	211	212	212	212	214	214
0.97	215	215	217	217	217	219	219	220	220	222
0.98	222	224	224	224	225	225	227	227	228	228
0.99	228	230	230	231	231	233	233	233	235	235
1.0	236	243	249	257	263	270	277	283	290	296
1.1	302	310	316	322	329	335	341	348	354	360
1.2	367	372	378	385	391	396	403	409	416	421
1.3	427	434	439	445	452	457	462	469	474	480
1.4	486	492	497	504	509	514	521	526	531	537
1.5	543	549	554	559	566	571	576	582	587	592
1.6	598	603	608	615	620	625	631	636	641	647
1.7	652	656	663	667	674	678	683	689	694	699
1.8	705	710	714	720	725	730	736	741	745	751
1.9	756	760	766	771	776	782	786	792	797	801
2.0	807	812	816	822	827	831	837	842	846	852
$\gamma=2.40$，$\alpha=0.41666666$										
0.00	−∞	−3018	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2159	−2033
0.01	−2033	−1936	−1936	−1936	−1857	−1857	−1789	−1789	−1731	−1731
0.02	−1731	−1679	−1679	−1633	−1633	−1663	−1591	−1591	−1553	−1553
0.03	−1517	−1517	−1517	−1485	−1485	−1454	−1454	−1454	−1426	−1426
0.04	−1399	−1399	−1373	−1373	−1373	−1350	−1350	−1327	−1327	−1327
0.05	−1305	−1305	−1284	−1284	−1264	−1264	−1264	−1245	−1245	−1227
0.06	−1227	−1227	−1210	−1210	−1193	−1193	−1177	−1177	−1177	−1161
0.07	−1161	−1146	−1146	−1146	−1131	−1131	−1117	−1117	−1103	−1103
0.08	−1103	−1089	−1089	−1076	−1076	−1076	−1063	−1063	−1051	−1051
0.09	−1039	−1039	−1039	−1027	−1027	−1016	−1016	−1016	−1004	−1004
0.10	−993	−993	−983	−983	−983	−972	−972	−962	−962	−962
0.11	−952	−952	−942	−942	−932	−932	−932	−923	−923	−914
0.12	−914	−914	−904	−904	−896	−896	−887	−887	−887	−878
0.13	−878	−870	−870	−870	−861	−861	−853	−853	−845	−845
0.14	−845	−837	−837	−829	−829	−829	−822	−822	−814	−814
0.15	−807	−807	−807	−799	−799	−792	−792	−792	−785	−785
0.16	−778	−778	−771	−771	−771	−764	−764	−757	−757	−757
0.17	−751	−751	−744	−744	−737	−737	−737	−731	−731	−725
0.18	−725	−725	−718	−718	−712	−712	−706	−706	−706	−700
0.19	−700	−694	−694	−694	−688	−688	−682	−682	−677	−677
0.20	−677	−671	−671	−665	−665	−665	−660	−660	−654	−654
0.21	−649	−649	−649	−643	−643	−638	−638	−638	−632	−632
0.22	−627	−627	−622	−622	−622	−617	−617	−612	−612	−612
0.23	−607	−607	−602	−602	−597	−597	−597	−592	−592	−587
0.24	−587	−587	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−572	−568
0.25	−568	−563	−563	−563	−558	−558	−554	−554	−549	−549
0.26	−549	−545	−545	−540	−540	−540	−536	−536	−531	−531
0.27	−527	−527	−527	−523	−523	−518	−518	−518	−514	−514
0.28	−510	−510	−506	−506	−506	−501	−501	−497	−497	−497
0.29	−493	−493	−489	−489	−485	−485	−485	−481	−481	−477
0.30	−477	−477	−473	−473	−469	−469	−465	−465	−465	−461
0.31	−461	−457	−457	−457	−453	−453	−450	−450	−446	−446
0.32	−446	−442	−442	−438	−438	−438	−434	−434	−431	−431
0.33	−427	−427	−427	−423	−423	−420	−420	−420	−416	−416
0.34	−413	−413	−409	−409	−409	−405	−405	−402	−402	−402
0.35	−398	−398	−395	−395	−391	−391	−391	−388	−388	−384
0.36	−384	−384	−381	−381	−378	−378	−374	−374	−374	−371
0.37	−371	−368	−368	−368	−364	−364	−361	−361	−358	−358
0.38	−358	−354	−354	−351	−351	−351	−348	−348	−345	−345
0.39	−342	−342	−342	−338	−338	−335	−335	−335	−332	−332
0.40	−329	−329	−326	−326	−326	−323	−323	−320	−320	−320

续表

$\gamma=2.40$, $a=0.41666666$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.41	−316	−316	−313	−313	−310	−310	−310	−307	−307	−304
0.42	−304	−304	−301	−301	−298	−298	−295	−295	−295	−292
0.43	−292	−289	−289	−289	−286	−286	−284	−284	−281	−281
0.44	−281	−278	−278	−275	−275	−275	−272	−272	−269	−269
0.45	−266	−266	−266	−263	−263	−261	−261	−261	−258	−258
0.46	−255	−255	−252	−252	−252	−249	−249	−247	−247	−247
0.47	−244	244	−241	−241	−238	−238	−238	−236	−236	−233
0.48	−233	−233	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−225	−222
0.49	−222	−220	−220	−220	−217	−217	−214	−214	−212	−212
0.50	−212	−209	−209	−206	−206	−205	−204	−204	−201	−201
0.51	−199	−199	−199	−196	−196	−193	−193	−193	−191	−191
0.52	−188	−188	−186	−186	−186	−183	−183	−181	−181	−181
0.53	−178	−178	−176	−176	−173	−173	−173	−171	−171	−168
0.54	−168	−168	−166	−166	−163	−163	−161	−161	−161	−158
0.55	−158	−156	−156	−156	−154	−154	−151	−151	−149	−149
0.56	−149	−146	−146	−144	−144	−144	−142	−142	−139	−139
0.57	−137	−137	−137	−134	−134	−132	−132	−132	−130	−130
0.58	−127	−127	−125	−125	−125	−123	−123	−120	−120	−120
0.59	−118	−118	−116	−116	−113	−113	−113	−111	−111	−109
0.60	−109	−109	−107	−107	−104	−104	−102	−102	−102	−100
0.61	−100	−098	−098	−098	−095	−095	−093	−093	−091	−091
0.62	−091	−089	−089	−086	−086	−086	−084	−084	−082	−082
0.63	−080	−080	−080	−078	−078	−075	−075	−075	−073	−073
0.64	−071	−071	−069	−069	−069	−066	−066	−064	−064	−064
0.65	−062	−062	−060	−060	−058	−058	−058	−056	−056	−054
0.66	−054	−054	−052	−052	−049	−049	−047	−047	−047	−045
0.67	−045	−043	−043	−043	−041	−041	−039	−039	−037	−037
0.68	−037	−035	−035	−033	−033	−033	−031	−031	−029	−029
0.69	−026	−026	−026	−024	−024	−022	−022	−022	−020	−020
0.70	−018	−018	−016	−016	−016	−014	−014	−012	−012	−012
0.71	−010	−010	−008	−008	−006	−006	−006	−004	−004	−002
0.72	−002	−002	000	000	002	002	004	004	004	006
0.73	006	008	008	008	010	010	012	012	014	014
0.74	014	016	016	018	018	018	020	020	022	022
0.75	024	024	024	026	026	027	027	027	029	029
0.76	031	031	033	033	033	035	035	037	037	037
0.77	039	039	041	041	043	043	043	045	045	047
0.78	047	047	049	049	050	050	052	052	052	054
0.79	054	056	056	056	058	058	060	060	062	062
0.80	062	064	064	065	065	065	067	067	069	069
0.81	071	071	071	073	073	075	075	075	077	077
0.82	078	078	080	080	080	082	082	084	084	084
0.83	086	086	088	088	089	089	089	091	091	093
0.84	093	093	095	095	097	097	098	098	096	100
0.85	100	102	102	102	104	104	106	106	107	107
0.86	107	109	109	111	111	111	113	113	114	114
0.87	116	116	116	118	118	120	120	120	121	121
0.88	123	123	125	125	125	127	127	128	128	128
0.89	130	130	132	132	134	134	134	135	135	137
0.90	137	137	139	139	141	141	142	142	142	144
0.91	144	146	146	146	147	147	149	149	151	151
0.92	151	153	153	154	154	154	156	156	158	158
0.93	159	159	159	161	161	163	163	163	164	164
0.94	166	166	168	168	168	170	170	171	171	171
0.95	173	173	175	175	176	176	176	178	178	180
0.96	180	180	181	181	183	183	184	184	184	186
0.97	186	188	188	188	189	189	191	191	193	193
0.98	193	194	194	196	196	196	198	198	199	199
0.99	201	201	201	203	203	204	204	204	206	206
1.0	207	214	220	227	233	241	247	253	260	266
1.1	272	280	286	292	299	304	310	317	322	329
1.2	335	341	347	354	360	365	371	377	382	389
1.3	395	401	406	412	417	424	430	435	441	446
1.4	452	458	464	469	474	480	485	492	497	502
1.5	508	513	518	524	530	535	540	545	550	557

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					$\gamma=2.40$，$\alpha=0.41666666$					
1.6	562	567	572	577	582	588	593	598	603	608
1.7	613	620	625	629	634	639	644	650	655	660
1.8	665	670	675	681	686	690	695	700	705	711
1.9	716	720	725	730	735	741	745	750	755	759
2.0	764	770	775	779	784	789	793	799	804	808
					$\gamma=2.50$，$\alpha=0.40000000$					
0.00	−∞	−3036	−2637	−2637	−2336	−2336	−2336	−2159	−2159	−2033
0.01	−2033	−2033	−1936	−1936	−1857	−1857	−1857	−1789	−1789	−1731
0.02	−1731	−1731	−1679	−1679	−1633	−1633	−1633	−1591	−1591	−1553
0.03	−1553	−1553	−1517	−1517	−1485	−1485	−1485	−1454	−1454	−1426
0.04	−1426	−1426	−1399	−1399	−1373	−1373	−1373	−1350	−1350	−1327
0.05	−1327	−1327	−1305	−1305	−1284	−1284	−1284	−1264	−1264	−1245
0.06	−1245	−1245	−1227	−1227	−1210	−1210	−1210	−1193	−1193	−1177
0.07	−1177	−1177	−1161	−1161	−1146	−1146	−1146	−1131	−1131	−1117
0.08	−1117	−1117	−1103	−1103	−1089	−1089	−1089	−1076	−1076	−1063
0.09	−1063	−1063	−1051	−1051	−1039	−1039	−1039	−1027	−1027	−1016
0.10	−1016	−1016	−1004	−1004	−993	−993	−993	−983	−983	−972
0.11	−972	−972	−962	−962	−952	−952	−952	−942	−942	−932
0.12	−932	−932	−923	−923	−914	−914	−914	−904	−904	−896
0.13	−896	−896	−887	−887	−878	−878	−878	−870	−870	−861
0.14	−861	−861	−853	−853	−845	−845	−845	−837	−837	−829
0.15	−829	−829	−822	−822	−814	−814	−814	−807	−807	−799
0.16	−799	−799	−792	−792	−785	−785	−785	−778	−778	−771
0.17	−771	−771	−764	−764	−757	−757	−757	−751	−751	−744
0.18	−744	−744	−737	−737	−731	−731	−731	−725	−725	−718
0.19	−718	−718	−712	−712	−706	−706	−706	−700	−700	−694
0.20	−694	−694	−688	−688	−682	−682	−682	−677	−677	−671
0.21	−671	−671	−665	−665	−660	−660	−660	−654	−654	−649
0.22	−649	−649	−643	−643	−638	−638	−638	−632	−632	−627
0.23	−627	−627	−622	−622	−617	−617	−617	−612	−612	−607
0.24	−607	−607	−602	−602	−597	−597	−597	−592	−592	−587
0.25	−587	−587	−582	−582	−577	−577	−577	−572	−572	−568
0.26	−568	−568	−563	−563	−558	−558	−558	−554	−554	−549
0.27	−549	−549	−545	−545	−540	−540	−540	−536	−536	−531
0.28	−531	−531	−527	−527	−523	−523	−523	−518	−518	−514
0.29	−514	−514	−510	−510	−506	−506	−506	−501	−501	−497
0.30	−497	−497	−493	−493	−489	−489	−489	−485	−485	−481
0.31	−481	−481	−477	−477	−473	−473	−473	−469	−469	−465
0.32	−465	−465	−461	−461	−457	−457	−457	−453	−453	−450
0.33	−450	−450	−446	−446	−442	−442	−442	−438	−438	−434
0.34	−434	−434	−431	−431	−427	−427	−427	−423	−423	−420
0.35	−420	−420	−416	−416	−413	−413	−413	−409	−409	−405
0.36	−405	−405	−402	−402	−398	−398	−398	−395	−395	−391
0.37	−391	−391	−388	−388	−384	−384	−384	−381	−381	−378
0.38	−378	−378	−374	−374	−371	−371	−371	−368	−368	−364
0.39	−364	−364	−361	−361	−358	−358	−358	−354	−354	−351
0.40	−351	−351	−348	−348	−345	−345	−345	−342	−342	−338
0.41	−338	−338	−335	−335	−332	−332	−332	−329	−329	−326
0.42	−326	−326	−323	−323	−320	−320	−320	−316	−316	−313
0.43	−313	−313	−310	−310	−307	−307	−307	−304	−304	−301
0.44	−301	−301	−298	−298	−295	−295	−295	−292	−292	−289
0.45	−289	−289	−286	−286	−284	−284	−284	−281	−281	−278
0.46	−278	−278	−275	−275	−272	−272	−272	−269	−269	−266
0.47	−266	−266	−263	−263	−261	−261	−261	−258	−258	−255
0.48	−255	−255	−252	−252	−249	−249	−249	−247	−247	−244
0.49	−244	−244	−241	−241	−238	−238	−238	−236	−236	−233
0.50	−233	−233	−230	−230	−228	−228	−228	−225	−225	−222
0.51	−222	−222	−220	−220	−217	−217	−217	−214	−214	−212
0.52	−212	−212	−209	−209	−206	−206	−206	−204	−204	−201
0.53	−201	−201	−199	−199	−196	−196	−196	−193	−193	−191
0.54	−191	−191	−188	−188	−186	−186	−186	−183	−183	−181
0.55	−181	−181	−178	−178	−176	−176	−176	−173	−173	−171
0.56	−171	−171	−168	−168	−166	−166	−166	−163	−163	−161
0.57	−161	−161	−158	−158	−156	−156	−156	−154	−154	−151
0.58	−151	−151	−149	−149	−146	−146	−146	−144	−144	−142
0.59	−142	−142	−139	−139	−137	−137	−137	−134	−134	−132
0.60	−132	−132	−130	−130	−127	−127	−127	−125	−125	−123

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=2.50$, $\alpha=0.40000000$										
0.61	-123	-123	-120	-120	-118	-118	-118	-116	-116	-113
0.62	-113	-113	-111	-111	-109	-109	-109	-107	-107	-104
0.63	-104	-104	-102	-102	-100	-100	-100	-098	-098	-095
0.64	-095	-095	-093	-093	-091	-091	-091	-089	-089	-086
0.65	-086	-086	-084	-084	-082	-082	-082	-080	-080	-078
0.66	-078	-078	-075	-075	-073	-073	-073	-071	-071	-069
0.67	-069	-069	-066	-065	-064	-064	-064	-062	-062	-060
0.68	-060	-060	-058	-058	-056	-056	-056	-054	-054	-052
0.69	-052	-052	-049	-049	-047	-047	-047	-045	-045	-043
0.70	-043	-043	-041	-041	-039	-039	-039	-037	-037	-035
0.71	-035	-035	-033	-033	-031	-031	-031	-029	-029	-026
0.72	-026	-026	-024	-024	-022	-022	-022	-020	-020	-018
0.73	-018	-018	-016	-015	-014	-014	-014	-012	-012	-010
0.74	-010	-010	-008	-008	-006	-006	-006	-004	-004	-002
0.75	-002	-002	000	000	002	002	002	004	004	006
0.76	006	006	008	008	010	010	010	012	012	014
0.77	014	014	016	016	018	018	018	020	020	022
0.78	022	022	024	024	026	026	026	027	027	029
0.79	029	029	031	031	033	033	033	035	035	037
0.80	037	037	039	039	041	041	041	043	043	045
0.81	045	045	047	047	049	049	049	050	050	052
0.82	052	052	054	054	056	056	056	058	058	060
0.83	060	060	062	062	064	064	064	065	065	067
0.84	067	067	069	069	071	071	071	073	073	075
0.85	075	075	077	077	078	078	078	080	080	082
0.86	082	082	084	084	086	086	086	088	088	089
0.87	089	089	091	091	093	093	093	095	095	097
0.88	097	097	098	098	100	100	100	102	102	104
0.89	104	104	106	106	107	107	107	109	109	111
0.90	111	111	113	113	114	114	114	116	116	118
0.91	118	118	120	120	121	121	121	123	123	125
0.92	125	125	127	127	128	128	128	130	130	132
0.93	132	132	134	134	135	135	135	137	137	139
0.94	139	139	141	141	142	142	142	144	144	146
0.95	146	146	147	147	149	149	149	151	151	153
0.96	153	153	154	154	156	156	156	158	158	159
0.97	159	159	161	161	163	163	163	164	164	166
0.98	166	166	168	168	170	170	170	171	171	173
0.99	173	173	175	175	176	176	176	178	178	180
1.0	180	186	193	199	206	212	219	225	231	238
1.1	244	250	257	263	269	275	281	287	293	299
1.2	305	311	317	323	329	335	341	347	352	358
1.3	364	370	375	381	387	392	398	403	409	415
1.4	420	426	431	437	442	447	453	458	464	469
1.5	474	480	485	490	496	501	506	511	517	522
1.6	527	532	537	543	548	553	558	563	568	573
1.7	578	583	588	593	598	603	608	613	618	623
1.8	628	633	638	643	648	653	658	663	667	672
1.9	677	682	687	692	696	701	706	711	716	720
2.0	725	730	735	739	744	749	753	758	763	768
$\gamma=2.60$, $\alpha=0.38461538$										
0.00	$-\infty$	-3051	-2637	-2637	-2336	-2336	-2336	-2159	-2159	-2159
0.01	-2033	-2033	-1936	-1936	-1936	-1857	-1857	-1789	-1789	-1789
0.02	-1731	-1731	-1731	-1679	-1679	-1633	-1633	-1633	-1591	-1591
0.03	-1553	-1553	-1553	-1517	-1517	-1517	-1485	-1485	-1454	-1454
0.04	-1454	-1426	-1426	-1399	-1399	-1399	-1373	-1373	-1373	-1350
0.05	-1350	-1327	-1327	-1327	-1305	-1305	-1284	-1284	-1284	-1264
0.06	-1264	-1264	-1245	-1245	-1227	-1227	-1227	-1210	-1210	-1193
0.07	-1193	-1193	-1177	-1177	-1177	-1161	-1161	-1146	-1146	-1146
0.08	-1131	-1131	-1117	-1117	-1117	-1103	-1103	-1103	-1089	-1089
0.09	-1076	-1076	-1076	-1063	-1063	-1051	-1051	-1051	-1039	[illegible]
0.10	-1039	-1027	-1027	-1016	-1016	-1016	-1004	-1004	-993	-993
0.11	-993	-983	-983	-983	-972	-972	-962	-962	-962	-952
0.12	-952	-942	-942	-942	-932	-932	-932	-923	923	-914
0.13	-914	-914	-904	-904	-896	-896	-896	-887	-887	-887
0.14	-878	-878	-870	-870	-870	-861	-861	-853	-853	-853
0.15	-845	-845	-845	-837	-837	-829	-829	-829	-822	-822

续表

$\gamma=2.60$, $\alpha=0.38461538$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.16	−814	−814	−814	−807	−807	−807	−799	−799	−792	−792
0.17	−792	−785	−785	−778	−778	−778	−771	−771	−771	−764
0.18	−764	−757	−757	−757	−751	−751	−744	−744	−744	−737
0.19	−737	−737	−731	−731	−725	−725	−725	−718	−718	−712
0.20	−712	−712	−706	−706	−706	−700	−700	−694	−694	−694
0.21	−688	−688	−682	−682	−682	−677	−677	−677	−671	−671
0.22	−665	−665	−665	660	−660	−654	−654	−654	−649	−649
0.23	−649	−643	−643	−638	−638	−638	−632	−632	−627	−627
0.24	−627	−622	−622	−622	−617	−617	−612	−612	−612	−607
0.25	−607	−602	−602	−602	−597	−597	−597	−592	−592	−587
0.26	−587	−587	−582	−582	−577	−577	−577	−572	−572	−572
0.27	−568	−568	−563	−563	−563	−558	−558	−554	−554	−554
0.28	−549	−549	−549	−545	−545	−540	−540	−540	−536	−536
0.29	−531	−531	−531	−527	−527	−527	−523	−523	−518	−518
0.30	−518	−514	−514	−510	−510	−510	−506	−506	−506	−501
0.31	−501	−497	−497	−497	−493	−493	−489	−489	−489	−485
0.32	−485	−485	−481	−481	−477	−477	−477	−473	−473	−469
0.33	−469	−469	−465	−465	−465	−461	−461	−457	−457	−457
0.34	−453	−453	−450	−450	−450	−446	−446	−446	−442	−442
0.35	−438	−438	−438	−434	−434	−431	−431	−431	−427	−427
0.36	−427	−423	−423	−420	−420	−420	−416	−416	−413	−413
0.37	−413	−409	−409	−409	−405	−405	−402	−402	−402	−398
0.38	−398	−395	−395	−395	−391	−391	−391	−388	−388	−384
0.39	−384	−384	−381	−381	−378	−378	−378	−374	−374	−374
0.40	−371	−371	−368	−368	−368	−364	−364	−361	−361	−361
0.41	−358	−358	−358	−354	−354	−351	−351	−351	−348	−348
0.42	−345	−345	−345	−342	−342	−342	−338	−338	−335	−335
0.43	−335	−332	−332	−329	−329	−329	−326	−326	−326	−323
0.44	−323	−320	−320	−320	−316	−316	−313	−313	−313	−310
0.45	−310	−310	−307	−307	−304	−304	−304	−301	−301	−298
0.46	−298	−298	−295	−295	−295	−292	−292	−289	−289	−289
0.47	−286	−286	−284	−284	−284	−281	−281	−281	−278	−278
0.48	−275	−275	−275	−272	−272	−269	−269	−269	−266	−266
0.49	−266	−263	−263	−261	−261	−261	−258	−258	−255	−255
0.50	−255	−252	−252	−252	−249	−249	−247	−247	−247	−244
0.51	−244	−241	−241	−241	−238	−238	−238	−236	−236	−233
0.52	−233	−233	−230	−230	−228	−228	−228	−225	−225	−225
0.53	−222	−222	−220	−220	−220	−217	−217	214	214	−214
0.54	−212	−212	−212	−209	−209	−206	−206	−206	−204	−204
0.55	−201	−201	−201	−199	−199	−199	−196	−196	−193	−193
0.56	−193	−191	−191	−188	−188	−188	−186	−186	−186	−183
0.57	−183	−181	−181	−181	−178	−178	−176	−176	−176	−173
0.58	−173	−173	−171	−171	−168	−168	−168	−166	−166	−163
0.59	−163	−163	−161	−161	−161	−158	−158	−156	−156	−156
0.60	−154	−154	−151	−151	−151	−149	−149	−149	−146	−146
0.61	−144	−144	−144	−142	−142	−139	−139	−139	−137	−137
0.62	−137	−134	−134	−132	−132	−132	−130	−130	−127	−127
0.63	−127	−125	−125	−125	−123	−123	−120	−120	−120	−118
0.64	−118	−116	−116	−116	−113	−113	−113	−111	−111	−109
0.65	−109	−109	−107	−107	−104	−104	−104	−102	−102	−102
0.66	−100	−100	−098	−098	−098	−095	−095	−093	−093	−093
0.67	−091	−091	−091	−089	−089	−086	−086	−086	−084	−084
0.68	−082	−082	−082	−080	−080	−080	−078	−078	−075	−075
0.69	−075	−073	−073	−071	−071	−071	−069	−069	−069	−066
0.70	−066	−064	−064	−064	−062	−062	−060	−060	−060	−058
0.71	−058	−058	−056	−056	−054	−054	−054	−052	−052	−049
0.72	−049	−049	−047	−047	−047	−045	−045	−043	−043	−043
0.73	−041	−041	−039	−039	−039	−037	−037	−037	−035	−035
0.74	−033	−033	−033	−031	−031	−029	−029	−029	−026	−026
0.75	−026	−024	−024	−022	−022	−022	−020	−020	−018	−018
0.76	−018	−016	−016	−016	−014	−014	−012	−012	−012	−010
0.77	−010	−008	−008	−008	−006	−006	−006	−004	−004	−002
0.78	−002	−002	000	000	002	002	002	004	004	004
0.79	006	006	008	008	008	010	010	012	012	012
0.80	014	014	014	016	016	018	018	018	020	020

续表

γ=2.60, α=0.38461538										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.81	022	022	022	024	024	024	026	026	027	027
0.82	027	029	029	031	031	031	033	033	033	035
0.83	035	037	037	037	039	039	041	041	041	043
0.84	043	043	045	045	047	047	047	049	049	050
0.85	050	050	052	052	052	054	054	056	056	056
0.86	058	058	060	060	060	062	062	062	064	064
0.87	065	065	065	067	067	069	069	069	071	071
0.88	071	073	073	075	075	075	077	077	078	078
0.89	078	080	080	080	082	082	084	084	084	086
0.90	086	088	088	088	089	089	089	091	091	093
0.91	093	093	095	095	097	097	097	098	098	098
0.92	100	100	102	102	102	104	104	106	106	106
0.93	107	107	107	109	109	111	111	111	113	113
0.94	114	114	114	116	116	116	118	118	120	120
0.95	120	121	121	123	123	123	125	125	125	127
0.96	127	128	128	128	130	130	132	132	132	134
0.97	134	134	135	135	137	137	137	139	139	141
0.98	141	141	142	142	142	144	144	146	146	146
0.99	147	147	149	149	149	151	151	151	153	153
1.0	154	159	166	173	180	186	193	199	204	211
1.1	217	224	230	236	241	247	253	260	266	272
1.2	278	283	289	295	301	307	313	317	323	329
1.3	335	341	347	352	357	362	368	374	380	385
1.4	389	395	401	406	412	417	423	427	432	438
1.5	443	449	454	458	464	469	474	480	485	490
1.6	494	500	505	510	515	521	524	530	535	540
1.7	545	550	555	559	564	569	574	580	585	588
1.8	593	598	603	608	613	618	622	627	632	637
1.9	642	647	650	655	660	665	670	675	680	683
2.0	688	693	698	702	707	711	716	720	725	730

γ=2.70, α=0.37037037										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	$-\infty$	−3071	−2637	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2159
0.01	−2033	−2033	−2033	−1936	−1936	−1857	−1857	−1857	−1789	−1789
0.02	−1789	−1731	−1731	−1679	−1679	−1679	−1633	−1633	−1633	−1591
0.03	−1591	−1591	−1553	−1553	−1517	−1517	−1517	−1485	−1485	−1485
0.04	−1454	−1454	−1426	−1426	−1426	−1399	−1399	−1399	−1373	−1373
0.05	−1350	−1350	−1350	−1327	−1327	−1327	−1305	−1305	−1305	−1284
0.06	−1284	−1264	−1264	−1264	−1245	−1245	−1245	−1227	−1227	−1210
0.07	−1210	−1210	−1193	−1193	−1193	−1177	−1177	−1161	−1161	−1161
0.08	−1146	−1146	−1146	−1131	−1131	1131	1117	1117	1103	1103
0.09	−1103	−1089	−1089	−1089	−1076	−1076	−1063	−1063	−1063	−1051
0.10	−1051	−1051	−1039	−1039	−1027	−1027	−1027	−1016	−1016	−1016
0.11	−1004	−1004	−1004	−993	−993	−983	−983	−983	−972	−972
0.12	−972	−962	−962	−952	−952	−952	−942	−942	−942	−932
0.13	−932	−923	−923	−923	−914	−914	−914	−904	−904	−804
0.14	−896	−896	−887	−887	−887	−878	−878	−878	−870	−870
0.15	−861	−861	−861	−853	−853	−853	−845	−845	−837	−837
0.16	−837	−829	−829	−829	−822	−822	−822	−814	−814	−807
0.17	−807	−807	−799	−799	−799	−792	−792	−785	−785	−785
0.18	−778	−778	−778	−771	−771	−764	−764	−764	−757	−757
0.19	−757	−751	−751	−751	−744	−744	−737	−737	−737	−731
0.20	−731	−731	−725	−725	−718	−718	−718	−712	−712	−712
0.21	−706	−706	−700	−700	−700	−694	−694	−694	−688	−688
0.22	−688	−682	−682	−677	−677	−677	−671	−671	−671	−665
0.23	−665	−660	−660	−660	−654	−654	−654	−649	−649	−643
0.24	−643	−643	−638	−638	−638	−632	−632	−632	−627	−627
0.25	−622	−622	−622	−617	−617	−617	−612	−612	−607	−607
0.26	−607	−602	−602	−602	−597	−597	−592	−592	−592	−587
0.27	−587	−587	−582	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−572
0.28	−568	−568	−568	−563	−563	−558	−558	−558	−554	−554
0.29	−554	−549	−549	−545	−545	−545	−540	−540	−540	−536
0.30	−536	−536	−531	−531	−527	−527	−527	−523	−523	−523
0.31	−518	−518	−514	−514	−514	−510	−510	−510	−506	−506
0.32	−501	−501	−501	−497	−497	−497	−493	−493	−493	−489
0.33	−489	−485	−485	−485	−481	−481	−481	−477	−477	−473
0.34	−473	−473	−469	−469	−469	−465	−465	−461	−461	−461
0.35	−457	−457	−457	−453	−453	−453	−450	−450	−446	−446

续表

$\gamma=2.70$, $\alpha=0.37037037$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.36	−446	−442	−442	−442	−438	−438	−434	−434	−434	−431
0.37	−431	−431	−427	−427	−423	−423	−423	−420	−420	−420
0.38	−416	−416	−416	−413	−413	−409	−409	−409	−405	−405
0.39	−405	−402	−402	−398	−398	−398	−395	−395	−395	−391
0.40	−391	−388	−388	−388	−384	−384	−384	−381	−381	−381
0.41	−378	−378	−374	−374	−374	−371	−371	−371	−368	−368
0.42	−364	−364	−364	−361	−361	−361	−358	−358	−354	−354
0.43	−354	−351	−351	−351	−348	−348	−348	−345	−345	−342
0.44	−342	−342	−338	−338	−338	−335	−335	−332	−332	−332
0.45	−329	−329	−329	−326	−326	−323	−323	−323	−320	−320
0.46	−320	−316	−316	−316	−313	−313	−310	−310	−310	−307
0.47	−307	−307	−304	−304	−301	−301	−301	−298	−298	−298
0.48	−295	−295	−292	−292	−292	−289	−289	−289	−286	−286
0.49	−286	−284	−284	−281	−281	−281	−278	278	−278	−275
0.50	−275	−272	−272	−272	−269	−269	−269	−266	−266	−263
0.51	−263	−263	−261	−261	−261	−258	−258	−258	−255	−255
0.52	−252	−252	−252	−249	−249	−249	−247	−247	−244	−244
0.53	−244	−241	−241	−241	−238	−238	−236	−236	−236	−233
0.54	−233	−233	−230	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−225
0.55	−222	−222	−222	−220	−220	−217	−217	−217	−214	−214
0.56	−214	−212	−212	−209	−209	−209	−206	−206	−206	−204
0.57	−204	−204	−201	−201	−199	−199	−199	−196	−196	−196
0.58	−193	−193	−191	−191	−191	−188	−188	−188	−186	−186
0.59	−183	−183	−183	−181	−181	−181	−178	−178	−178	−176
0.60	−176	−173	−173	−173	−171	−171	−171	−168	−168	−166
0.61	−166	−166	−163	−163	−163	−161	−161	−158	−158	−158
0.62	−156	−156	−156	−154	−154	−154	−151	−151	−149	−149
0.63	−149	−146	−146	−146	−144	−144	−142	−142	−142	−139
0.64	−139	−139	−137	−137	−134	−134	−134	−132	−132	−132
0.65	−130	−130	−130	−127	−127	−125	−125	−125	−123	−123
0.66	−123	−120	−120	−118	−118	−118	−116	−116	−116	−113
0.67	−113	−111	−111	−111	−109	−109	−109	−107	−107	−107
0.68	−104	−104	−102	−102	−102	−100	−100	−100	−098	−098
0.69	−095	−095	−095	−093	−093	−093	−091	−091	−089	−089
0.70	−089	−086	−086	−086	−084	−084	−084	−082	−082	−080
0.71	−080	−080	−078	−078	−078	−075	−075	−073	−073	−073
0.72	−071	−071	−071	−069	−069	−066	−066	−066	−064	−064
0.73	−064	−062	−062	−062	−060	−060	−058	−058	−058	−056
0.74	−056	−056	−054	−054	−052	−052	−052	−049	−049	−049
0.75	−047	−047	−045	−045	−045	−043	−043	−043	−041	−041
0.76	−041	−039	−039	−037	−037	−037	−035	−035	−035	−033
0.77	−033	−031	−031	−031	−029	−029	−029	−026	−026	−024
0.78	−024	−024	−022	−022	−022	−020	−020	−020	−018	−018
0.79	−016	−016	−016	−014	−014	−014	−012	−012	−010	−010
0.80	−010	−008	−008	−008	−006	−006	004	004	−004	−002
0.81	−002	−002	000	000	000	002	002	004	004	004
0.82	006	006	006	008	008	010	010	010	012	012
0.83	012	014	014	016	016	016	018	018	018	020
0.84	020	020	022	022	024	024	024	026	026	026
0.85	027	027	029	029	029	031	031	031	033	033
0.86	035	035	035	037	037	037	039	039	039	041
0.87	041	043	043	043	045	045	045	047	047	049
0.88	049	049	050	050	050	052	052	054	054	054
0.89	056	056	056	058	058	058	060	060	062	062
0.90	062	064	064	064	065	065	067	067	067	069
0.91	069	069	071	071	073	073	073	075	075	075
0.92	077	077	077	078	078	080	080	080	082	082
0.93	082	084	084	086	086	086	088	088	088	089
0.94	089	091	091	091	093	093	093	095	095	095
0.95	097	097	098	098	098	100	100	100	102	102
0.96	104	104	104	106	106	106	107	107	109	109
0.97	109	111	111	111	113	113	113	114	114	116
0.98	116	116	118	118	118	120	120	121	121	121
0.99	123	123	123	125	125	127	127	127	128	128
1.0	128	135	142	147	154	161	168	173	180	186

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=2.70$, $\alpha=0.37037037$										
1.1	191	198	204	211	215	222	228	233	239	246
1.2	250	257	263	269	274	280	286	290	295	302
1.3	307	313	319	325	329	335	341	345	351	357
1.4	362	367	372	378	382	388	394	398	403	409
1.5	415	419	424	430	434	439	445	449	454	460
1.6	465	469	474	480	484	489	494	500	504	509
1.7	514	518	523	528	532	537	543	548	552	557
1.8	562	566	571	576	680	585	590	595	598	603
1.9	608	612	617	622	627	631	636	641	644	649
2.0	654	658	663	667	672	676	681	686	689	694
$\gamma=2.80$, $\alpha=0.35714285$										
0.00	$-\infty$	−3086	−2637	−2637	−2637	−2336	−2336	−2159	−2159	−2159
0.01	−2033	−2033	−2033	−1936	−1936	−1936	−1857	−1857	−1857	−1789
0.02	−1789	−1731	−1731	−1731	−1679	−1679	−1679	−1633	−1633	−1633
0.03	−1591	−1591	−1591	−1553	−1553	−1517	−1517	−1517	−1485	−1485
0.04	−1485	−1454	−1454	−1454	−1426	−1426	−1426	−1399	−1399	−1373
0.05	−1373	−1373	−1350	−1350	−1350	−1327	−1327	−1327	−1305	−1305
0.06	−1305	−1284	−1284	−1264	−1264	−1264	−1245	−1245	−1245	−1227
0.07	−1227	−1227	−1210	−1210	−1210	−1193	−1193	−1177	−1177	−1177
0.08	−1161	−1161	−1161	−1146	−1146	−1146	−1131	−1131	−1131	−1117
0.09	−1117	−1103	−1103	−1103	−1089	−1089	−1089	−1076	−1076	−1076
0.10	−1063	−1063	−1063	−1051	−1051	−1039	−1039	−1039	−1027	−1027
0.11	−1027	−1016	−1016	−1016	−1004	−1004	−1004	−993	−993	−983
0.12	−983	−983	−972	−972	−972	−962	−962	−962	−952	−952
0.13	−952	−942	−942	−932	−932	−932	−923	−923	−923	−914
0.14	−914	−914	−904	−904	−904	−896	−896	−887	−887	−887
0.15	−878	−878	−878	−870	−870	−870	−861	−861	−861	−853
0.16	−853	−845	−845	−845	−837	−837	−837	−829	−829	−829
0.17	−822	−822	−822	−814	−814	−807	−807	−807	−799	−799
0.18	−799	−792	−792	−792	−785	−785	−785	−778	−778	−771
0.19	−771	−771	−764	−764	−764	−757	−757	−757	−751	−751
0.20	−751	−744	−744	−737	−737	−737	−731	−731	−731	−725
0.21	−725	−725	−718	−718	−718	−712	−712	−706	−706	−706
0.22	−700	−700	−700	−694	−694	−694	−688	−688	−688	−682
0.23	−682	−677	−677	−677	−671	−671	−671	−665	−665	−665
0.24	−660	−660	−660	−654	−654	−649	−649	−649	−643	−643
0.25	−643	−638	−638	−638	−632	−632	−632	−627	−627	−622
0.26	−622	−622	−617	−617	−617	−612	−612	−612	−607	−607
0.27	−607	−602	−602	−597	−597	−597	−592	−592	−592	−587
0.28	−587	−587	−582	−582	−582	−577	−577	−572	−572	−572
0.29	−568	−568	−568	−563	−563	−563	−558	−558	−558	−554
0.30	−554	−549	−549	−549	−545	−545	−545	−540	−540	−540
0.31	−536	−536	−536	−531	−531	−527	−527	−527	−523	−523
0.32	−523	−518	−518	−518	−514	−514	−514	−510	−510	−506
0.33	−506	−506	−501	−501	−501	−497	−497	−497	−493	−493
0.34	−493	−489	−489	−485	−485	−485	−481	−481	−481	−477
0.35	−477	−477	−473	−473	−473	−469	−469	−465	−465	−465
0.36	−461	−461	−461	−457	−457	−457	−453	−453	−453	−450
0.37	−450	−446	−446	−446	−442	−442	−442	−438	−438	−438
0.38	−434	−434	−434	−431	−431	−427	−427	−427	−423	−423
0.39	−423	−420	−420	−420	−416	−416	−416	−413	−413	−409
0.40	−409	−409	−405	−405	−405	−402	−402	−402	−398	−398
0.41	−398	−395	−395	−391	−391	−391	−388	−388	−388	−384
0.42	−384	−384	−381	−381	−381	−378	−378	−374	−374	−374
0.43	−371	−371	−371	−368	−368	−368	−364	−364	−364	−361
0.44	−361	−358	−358	−358	−354	−354	−354	−351	−351	−351
0.45	−348	−348	−348	−345	−345	−342	−342	−342	−338	−338
0.46	−338	−335	−335	−335	−332	−332	−332	−329	−329	−326
0.47	−326	−326	−323	−323	−323	−320	−320	−320	−316	−316
0.48	−316	−313	−313	−310	−310	−310	−307	−307	−307	−304
0.49	−304	−304	−301	−301	−301	−298	−298	−295	−295	−295
0.50	−292	−292	−292	−289	−289	−289	−286	−286	−286	−284
0.51	−284	−281	−281	−281	−278	−278	−278	−275	−275	−275
0.52	−272	−272	−272	−269	−269	−266	−266	−266	−263	−263
0.53	−263	−261	−261	−261	−258	−258	−258	−255	−255	−252
0.54	−252	−252	−249	−249	−249	−247	−247	−247	−244	−244
0.55	−244	−241	−241	−238	−238	−238	−236	−236	−236	−233

续表

γ=2.80, α=0.35714285										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.56	−233	−233	−230	−230	−230	−228	−228	−225	−225	−225
0.57	−222	−222	−222	−220	−220	−220	−217	−217	−217	−214
0.58	−214	−212	−212	−212	−209	−209	−209	−206	−206	−206
0.59	−204	−204	−204	−201	−201	−199	−199	−199	−196	−196
0.60	−196	−193	−193	−193	−191	−191	−191	−188	−188	−186
0.61	−186	−186	−183	−183	−183	−181	−181	−181	−178	−178
0.62	−178	−176	−176	−173	−173	−173	−171	−171	−171	−168
0.63	−168	−168	−166	−166	−166	−163	−163	−161	−161	−161
0.64	−158	158	158	−156	−156	−156	−154	−154	−154	−151
0.65	−151	−149	−149	−149	−146	−146	−146	−144	−144	−144
0.66	−142	−142	−142	−139	−139	−137	−137	−137	−134	−134
0.67	−134	−132	−132	−132	−130	−130	−130	−127	−127	−125
0.68	−125	−125	−123	−123	−123	−120	−120	−120	−118	−118
0.69	−118	−116	−116	−113	−113	−113	−111	−111	−111	−109
0.70	−109	−109	−107	−107	−107	−104	−104	−102	−102	−102
0.71	−100	−100	−100	−098	−098	−098	−095	−095	−095	−093
0.72	−093	−091	−091	−091	−089	−089	−089	−086	−086	−086
0.73	−084	−084	−084	−082	−082	−080	−080	−080	−078	−078
0.74	−078	−075	−075	−075	−073	−073	−073	−071	−071	−069
0.75	−069	−069	−066	−066	−066	−064	−064	−064	−062	−062
0.76	−062	−060	−060	−058	−058	−058	−056	−056	−056	−054
0.77	−054	−054	−052	−052	−052	−049	−049	−047	−047	−047
0.78	−045	−045	−045	−043	−043	−043	−041	−041	−041	−039
0.79	−039	−037	−037	−037	−035	−035	−035	−033	−033	−033
0.80	−031	−031	−031	−029	−029	−026	−026	−026	−024	−024
0.81	−024	−022	−022	−022	−020	−020	−020	−018	−018	−016
0.82	−016	−016	−014	−014	−014	−012	−012	−012	−010	−010
0.83	−010	−008	−008	−006	−006	−006	−004	−004	−004	−002
0.84	−002	−002	000	000	000	002	002	004	004	004
0.85	006	006	006	008	008	008	010	010	010	012
0.86	012	014	014	014	016	016	016	018	018	018
0.87	020	020	020	022	022	024	024	024	026	026
0.88	026	027	027	027	029	029	029	031	031	033
0.89	033	033	035	035	035	037	037	037	039	039
0.90	039	041	041	043	043	043	045	045	045	047
0.91	047	047	049	049	049	050	050	052	052	052
0.92	054	054	054	056	056	056	058	058	058	060
0.93	060	062	062	062	064	064	064	065	065	065
0.94	067	067	067	069	069	071	071	071	073	073
0.95	073	075	075	075	077	077	077	078	078	080
0.96	080	080	082	082	082	084	084	084	086	086
0.97	086	088	088	089	089	089	091	091	091	093
0.98	093	093	095	095	095	097	097	098	098	098
0.99	100	100	100	102	102	102	104	104	104	106
1.0	106	113	118	125	130	137	144	149	156	161
1.1	168	173	180	186	191	198	203	209	214	220
1.2	227	231	238	243	249	253	260	266	270	277
1.3	281	287	292	298	304	308	314	319	325	329
1.4	335	341	345	351	355	361	365	371	377	381
1.5	387	391	396	401	406	412	416	421	426	431
1.6	435	441	446	450	456	460	465	469	474	480
1.7	484	489	493	498	502	508	513	517	522	526
1.8	531	535	540	545	549	554	558	563	567	572
1.9	577	581	586	590	595	598	603	608	612	617
2.0	621	626	629	634	639	643	648	652	656	660
γ=2.90, α=0.34482758										
0.00	−∞	−3102	−2637	−2637	−2637	−2336	−2336	−2336	−2159	−2159
0.01	−2159	−2033	−2033	−2033	−1936	−1936	−1857	−1857	−1857	−1789
0.02	−1789	−1789	−1731	−1731	−1731	−1679	−1679	−1679	−1633	−1633
0.03	−1633	−1591	−1591	−1591	−1553	−1553	−1553	−1517	−1517	−1517
0.04	−1485	−1485	−1485	−1454	−1454	−1426	−1426	−1426	−1399	−1399
0.05	−1399	−1373	−1373	−1373	−1350	−1350	−1350	−1327	−1327	−1327
0.06	−1305	−1305	−1305	−1284	−1284	−1284	−1264	−1264	−1264	−1245
0.07	−1245	−1245	−1227	−1227	−1210	−1210	−1210	−1193	−1193	−1193
0.08	−1177	1177	−1177	−1161	−1161	−1161	−1146	−1146	−1146	−1131
0.09	−1131	−1131	−1117	−1117	−1117	−1103	−1103	−1103	−1089	−1089
0.10	−1089	−1076	−1076	−1063	−1063	−1063	−1051	−1051	−1051	−1039

续表

$\gamma=2.90$，$\alpha=0.34482758$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.11	−1039	−1039	−1027	−1027	−1027	−1016	−1016	−1016	−1004	−1004
0.12	−1004	−993	−993	−993	−983	−983	−983	−972	−972	−972
0.13	−962	−962	−952	−952	−952	−942	−942	−942	−932	−932
0.14	−932	−923	−923	−923	−914	−914	−914	−904	−904	−904
0.15	−896	−896	−896	−887	−887	−887	−878	−878	−878	−870
0.16	−870	−861	−861	−861	−853	−853	−853	−845	−845	−845
0.17	−837	−837	−837	−829	−829	−829	−822	−822	−822	−814
0.18	−814	−814	−807	−807	−807	−799	−799	−799	−792	−792
0.19	−785	−785	−785	−778	−778	−778	−771	−771	−771	−764
0.20	−764	−764	−757	−757	−757	−751	−751	−751	−744	−744
0.21	−744	−737	−737	−737	−731	−731	−731	−725	−725	−718
0.22	−718	−718	−712	−712	−712	−706	−706	−706	−700	−700
0.23	−700	−694	−694	−694	−688	−688	−688	−682	−682	−682
0.24	−677	−677	−677	−671	−671	−671	−665	−665	−660	−660
0.25	−660	−654	−654	−654	−649	−649	−649	−643	−643	−643
0.26	−638	−638	−638	−632	−632	−632	−627	−627	−627	−622
0.27	−622	−622	−617	−617	−617	−612	−612	−607	−607	−607
0.28	−602	−602	−602	−597	−597	−597	−592	−592	−592	−587
0.29	−587	−587	−582	−582	−582	−577	−577	−577	−572	−572
0.30	−572	−568	−568	−568	−563	−563	−558	−558	−558	−554
0.31	−554	−554	−549	−549	−549	−545	−545	−545	−540	−540
0.32	−540	−536	−536	−536	−531	−531	−531	−527	−527	−527
0.33	−523	−523	−523	−518	−518	−514	−514	−514	−510	−510
0.34	−510	−506	−506	−506	−501	−501	−501	−497	−497	−497
0.35	−493	−493	−493	−489	−489	−489	−485	−485	−485	−481
0.36	−481	−481	−477	−477	−473	−473	−473	−469	−469	−469
0.37	−465	−465	−465	−461	−461	−461	−457	−457	−457	−453
0.38	−453	−453	−450	−450	−450	−446	−446	−446	−442	−442
0.39	−442	−438	−438	−434	−434	−434	−431	−431	−431	−427
0.40	−427	−427	−423	−423	−423	−420	−420	−420	−416	−416
0.41	−416	−413	−413	−413	−409	−409	−409	−405	−405	−405
0.42	−402	−402	−398	−398	−398	−395	−395	−395	−391	−391
0.43	−391	−388	−388	−388	−384	−384	−384	−381	−381	−381
0.44	−378	−378	−378	−374	−374	−374	−371	−371	−371	−368
0.45	−368	−364	−364	−364	−361	−361	−361	−358	−358	−358
0.46	−354	−354	−354	−351	−351	−351	−348	−348	−348	−345
0.47	−345	−345	−342	−342	−342	−338	−338	−338	−335	−335
0.48	−332	−332	−332	−329	−329	−329	−326	326	−326	−323
0.49	−323	−323	−320	−320	−320	−316	−316	−316	−313	−313
0.50	−313	−310	−310	−310	−307	−307	−307	−304	−304	−301
0.51	−301	−301	−298	−298	−298	−295	−295	−295	−292	−292
0.52	−292	−289	−289	−289	−286	−286	−286	−284	−284	−284
0.53	−281	−281	−281	−278	−278	−278	−275	−275	−272	−272
0.54	−272	−269	−269	−269	−266	−266	−266	−263	−263	−263
0.55	−261	−261	−261	−258	−258	−258	−255	−255	−255	−252
0.56	−252	−252	−249	−249	−249	−247	−247	−244	−244	−244
0.57	−241	−241	−241	−238	−238	−238	−236	−236	−236	−233
0.58	−233	−233	−230	−230	−230	−228	−228	−228	−225	−225
0.59	−225	−222	−222	−222	−220	−220	−217	−217	−217	−214
0.60	−214	−214	−212	−212	−212	−209	−209	−209	−206	−206
0.61	−206	−204	−204	−204	−201	−201	−201	−199	−199	−199
0.62	−196	−196	−196	−193	−193	−191	−191	−191	−188	−188
0.63	−188	−186	−186	−186	−183	−183	−183	−181	−181	−181
0.64	−178	−178	−178	−176	−176	−176	−173	−173	−173	−171
0.65	−171	−171	−168	−168	−166	−166	−166	−163	−163	−163
0.66	−161	−161	−161	−158	−158	−158	−156	−156	−156	−154
0.67	−154	−154	−151	−151	−151	−149	−149	−149	−146	−146
0.68	−146	−144	−144	−142	−142	−142	−139	−139	−139	−137
0.69	−137	−137	−134	−134	−134	−132	−132	−132	−130	−130
0.70	−130	−127	−127	−127	−125	−125	−125	−123	−123	−123
0.71	−120	−120	−118	−118	−118	−116	−116	−116	−113	−113
0.72	−113	−111	−111	−111	−109	−109	−109	−107	−107	−107
0.73	−104	−104	−104	−102	−102	−102	−100	−100	−100	−098
0.74	−098	−095	−095	−095	−093	−093	−093	−091	−091	−091
0.75	−089	−089	−089	−086	−086	−086	−084	−084	−084	−082

续表

ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma=2.90$, $\alpha=0.34482758$										
0.76	−082	−082	−080	−080	−080	−078	−078	−078	−075	075
0.77	−073	−073	−073	−071	−071	−071	−069	−069	−069	−066
0.78	−066	−066	−064	−064	−064	−062	−062	−062	−060	−060
0.79	−060	−058	−058	−058	−056	−056	−056	−054	−054	−052
0.80	−052	−052	−049	−049	−049	−047	−047	−047	−045	−045
0.81	−045	−043	−043	−043	−041	−041	−041	−039	−039	−039
0.82	−037	−037	−037	−035	−035	−035	−033	−033	−031	−031
0.83	−031	−029	−029	−029	−026	−026	−026	−024	−024	−024
0.84	−022	−022	−022	−020	−020	−020	−018	−018	−018	−016
0.85	−016	−016	−014	−014	−014	−012	−012	−010	−010	−010
0.86	−008	−008	−008	−006	−006	−006	−004	−004	−004	−002
0.87	−002	−002	000	000	000	002	002	002	004	004
0.88	004	006	006	006	008	008	010	010	010	012
0.89	012	012	014	014	014	016	016	016	018	018
0.90	018	020	020	020	022	022	022	024	024	024
0.91	026	026	026	027	027	029	029	029	031	031
0.92	031	033	033	033	035	035	035	037	037	037
0.93	039	039	039	041	041	041	043	043	043	045
0.94	045	045	047	047	049	049	049	050	050	050
0.95	052	052	052	054	054	054	056	056	056	058
0.96	058	058	060	060	060	062	062	062	064	064
0.97	064	065	065	067	067	067	069	069	069	071
0.98	071	071	073	073	073	075	075	075	077	077
0.99	077	078	078	078	080	080	080	082	082	082
1.0	084	089	097	102	109	114	121	127	132	139
1.1	144	151	156	163	168	175	180	184	191	196
1.2	203	207	214	219	225	230	235	241	246	252
1.3	257	263	267	274	278	284	289	293	299	304
1.4	310	314	320	325	331	335	339	345	349	355
1.5	360	365	370	375	380	384	389	394	399	403
1.6	409	413	419	423	428	432	437	442	446	452
1.7	456	461	465	470	474	478	484	488	493	497
1.8	502	506	511	515	519	524	528	534	537	543
1.9	546	552	555	561	564	568	573	577	582	586
2.0	591	595	600	603	607	612	616	621	625	629
$\gamma=3.00$, $\alpha=0.33333333$										
0.00	−∞	−3114	−2637	−2637	−2637	−2336	−2336	−2336	−2159	−2159
0.01	−2159	−2033	−2033	−2033	−1936	−1936	−1936	−1857	−1857	−1857
0.02	−1789	−1789	−1789	−1731	−1731	−1731	−1679	−1679	−1679	−1633
0.03	−1633	−1633	−1591	−1591	−1591	−1553	−1553	−1553	−1517	−1517
0.04	−1517	−1485	−1485	−1485	−1454	−1454	−1454	−1426	−1426	−1426
0.05	−1399	−1399	−1399	−1373	−1373	−1373	−1350	−1350	−1350	−1327
0.06	−1327	−1327	−1305	−1305	−1305	−1284	−1284	−1284	−1264	−1264
0.07	−1264	−1245	−1245	−1245	−1227	−1227	−1227	−1210	−1210	−1210
0.08	−1193	−1193	−1193	−1177	−1177	−1177	−1161	−1161	−1161	−1146
0.09	−1146	−1146	1131	1131	−1131	−1117	−1117	−1117	−1103	−1103
0.10	−1103	−1089	−1089	−1089	−1076	−1076	−1076	−1063	−1063	−1063
0.11	−1051	−1051	−1051	−1039	−1039	−1039	−1027	−1027	−1027	−1016
0.12	−1016	−1016	−1004	−1004	−1004	−993	−993	−993	−983	−983
0.13	−983	−972	−972	−972	−962	−962	−962	−952	−952	−952
0.14	−942	−942	−942	−932	−932	−932	−923	−923	−923	−914
0.15	−914	−914	−904	−904	−904	−896	−896	−896	−887	−887
0.16	−887	−878	−878	−878	−870	−870	−870	−861	−861	−861
0.17	−853	−853	−853	−845	−845	−845	−837	−837	−837	−829
0.18	−829	−829	−822	−822	−822	−814	−814	−814	−807	−807
0.19	−807	−799	−799	−799	−792	−792	−792	−785	−785	−785
0.20	−778	−778	−778	−771	−771	−771	−764	−764	−764	−757
0.21	−757	−757	−751	−751	−751	−744	−744	−744	−737	−737
0.22	−737	−731	−731	−731	−725	−725	−725	−718	−718	−718
0.23	−712	−712	−712	−706	−706	−706	−700	−700	−700	−694
0.24	−694	−694	−688	−688	−688	−682	−682	−682	−677	−677
0.25	−677	−671	−671	−671	−665	−665	−665	−660	−660	−660
0.26	−654	−654	−654	−649	−649	−649	−643	−643	−643	−638
0.27	−638	−638	−632	−632	−632	−627	−627	−627	−622	−622
0.28	−622	−617	−617	−617	−612	−612	−612	−607	−607	−607
0.29	−602	−602	−602	−597	−597	−597	−592	−592	−592	−587
0.30	−587	−587	−582	−582	−582	−577	−577	−577	−572	−572

续表

$\gamma=3.00,\ \alpha=0.33333333$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.31	−572	−568	−568	−568	−563	−563	−563	−558	−558	−558
0.32	−554	−554	−554	−549	−549	−549	−545	−545	−545	−540
0.33	−540	−540	−536	−536	−536	−531	−531	−531	527	−527
0.34	−527	−523	−523	−523	−518	−518	−518	−514	−514	−514
0.35	−510	−510	−510	−506	−506	−505	−501	−501	−501	−497
0.36	−497	−497	−493	−493	−493	−489	−489	−489	−485	−485
0.37	485	−481	−481	−481	−477	−477	−477	−473	−473	−473
0.38	−469	−469	−469	−465	−465	−465	−461	−461	−461	−457
0.39	−457	−457	−453	−453	−453	−450	−450	−450	−446	−446
0.40	−446	−442	−442	−442	−438	−438	−438	−434	−434	−434
0.41	−431	−431	−431	−427	−427	−427	−423	−423	−423	−420
0.42	−420	−420	−416	−416	−416	−413	−413	−413	−409	409
0.43	−409	−405	−405	−405	−402	−402	−402	−398	−398	−398
0.44	−395	−395	−395	−391	−391	−391	−388	−388	−388	−384
0.45	−384	−384	−381	−381	−381	−378	−378	−378	−374	−374
0.46	−374	−371	−371	−371	−368	−368	−368	−364	−364	−364
0.47	−361	−361	−361	−358	−358	−358	−354	−354	−354	−351
0.48	−351	−351	−348	−348	−348	−345	−345	−345	−342	−342
0.49	−342	−338	−338	−338	−335	−335	−335	−332	−332	−332
0.50	−329	−329	−329	−326	−326	−326	−323	−323	−323	−320
0.51	−320	−320	−315	−316	−316	−313	−313	−313	−310	−310
0.52	−310	−307	−307	−307	−304	−304	−304	−301	−301	−301
0.53	−298	−298	−298	−295	−295	−295	−292	−292	−292	−289
0.54	−289	−289	−286	−286	−286	−284	−284	−284	−281	−281
0.55	−281	−278	−278	−278	−275	−275	−275	−272	−272	−272
0.56	−269	−269	−269	−266	−266	−266	−263	263	−263	−261
0.57	−261	−261	−258	−258	−258	−255	−255	−255	−252	−252
0.58	−252	−249	−249	−249	−247	−247	−247	−244	−244	−244
0.59	−241	−241	−241	−238	−238	−238	−236	−236	−236	−233
0.60	−233	−233	−230	−230	−230	−228	−228	−228	−225	−225
0.61	−225	−222	−222	−222	−220	−220	−220	−217	−217	−217
0.62	−214	−214	−214	−212	−212	−212	−209	−209	−209	−206
0.63	−206	−206	−204	−204	−204	−201	−201	−201	−199	−199
0.64	−199	−196	−196	−196	−193	−193	−193	−191	−191	−191
0.65	−188	−188	−188	−186	−186	−186	−183	−183	−183	−181
0.66	−181	−181	−178	−178	−178	−176	−176	−176	−173	−173
0.67	−173	−171	−171	−171	−168	−168	−168	−166	−166	−166
0.68	−163	−163	−163	−161	−161	−161	−158	−158	−158	−156
0.69	−156	−156	−154	−154	−154	−151	−151	−151	−149	−149
0.70	−149	−146	−146	−146	−144	−144	−144	−142	−142	−142
0.71	−139	−139	−139	−137	−137	−137	−134	−134	−134	−132
0.72	−132	−132	−130	−130	−130	−127	−127	−127	−125	−125
0.73	−125	−123	−123	−123	−120	−120	−120	−118	−118	−118
0.74	−116	−116	−116	−113	−113	−113	111	−111	−111	−109
0.75	−109	−109	−107	−107	−107	−104	−104	−104	−102	−102
0.76	−102	−100	−100	−100	−098	−098	−098	−095	−095	−095
0.77	−093	−093	−093	−091	−091	−091	−089	−089	−089	−086
0.78	−086	−086	−084	−084	−084	−082	−082	−082	−080	−080
0.79	−080	−078	−078	−078	−075	−075	−075	−073	−073	−073
0.80	−071	−071	−071	−069	−069	−069	−066	−066	−066	−064
0.81	−064	−064	−062	−062	−062	−060	−060	−060	−058	−058
0.82	−058	−056	−056	−056	−054	−054	−054	−052	−052	−052

续表

$\gamma=3.00$，$\alpha=0.33333333$										
ΔS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.96	037	037	039	039	039	041	041	041	043	043
0.97	043	045	045	045	047	047	047	049	049	049
0.98	050	050	050	052	052	052	054	054	054	056
0.99	056	056	058	058	058	060	060	060	062	062
1.0	062	069	075	080	088	093	098	106	111	116
1.1	123	128	134	141	146	151	158	163	168	175
1.2	180	184	191	196	201	207	212	217	224	228
1.3	233	239	244	249	255	260	264	270	275	280
1.4	286	290	295	301	305	310	316	320	325	331
1.5	335	339	345	349	354	360	364	368	374	378
1.6	382	388	392	396	402	406	410	416	420	424
1.7	430	434	438	443	447	452	457	461	465	470
1.8	474	478	484	488	492	497	501	505	510	514
1.9	518	523	527	531	536	540	544	549	553	557
2.0	562	566	569	574	578	582	587	591	595	600

注：$\alpha=\frac{1}{\gamma}$，即 α 为感光板反衬度的倒数。

表 2-14　影响谱线强度的元素或化合物[7]

受影响的元素	造成谱线增强的元素（或化合物）	造成谱线削弱的元素（或化合物）	其　他　影　响
Ag	大量的 Pb、Zn、Cu	大量的 Fe，Co，Ni，Mn，S	加入 $CaCO_3$ 和 C 粉可减弱其影响
As	Mg、Si、Pb 及大量 Sb、NH_4I；大量的 Zn	K_2SO_4	大量的 Fe 使 As 形成 Fe_3As 延长蒸发，加入 I，会形成碘化反应，灵敏度可以提高
B	AgCl 及大量的 Ca		C 易与 B 作用形成难挥发的 BC Zn 粉可促使 B 提前蒸发
Ba	Ca，KCl		碱金属，C 粉可消除成分影响
Be	C 粉，SiO_2	K 等碱金属	F 加速蒸发，减弱组分影响
Bi	NH_4I，K_2SO_4 及大量的 Pb		NH_4I 亦可减弱组分影响
Cd	$NH_4Cl+Li_2CO_3=1+3$ 的混合物，大量的 Zn	过量的碱金属	
Co		C	NaCl 使 Co 的蒸发受到抑制
Cu		Fe，Ca 大量，Cu 327.4nm 减弱；Mn 大量 Cu 282.4nm 减弱	碱金属，Pb，Zn，Fe，Mn 延长 Cu 的蒸发
Cr	SiO_2	Ca，Mg，C	Ca>20%时，Cr 线变细
Ga	大量的 Al、Pb、Zn、Sn、Bi、Na、S，Sb_2O_3，SiO_2，Fe		
Ge	大量的 Cu、Pb、Zn、Sb_2S_3，S，NH_4I		K 阻止 Fe 蒸发，加强 Ge 蒸发
Hg			Na 盐对 Hg 有抑制作用
In	Pb，Zn，Sb，Bi，NaCl，Li_2CO_3	SiO_2	
K	Ca，Na		
Li	碱金属氯化物		
Mn			不同分析线受影响不同
Mo			火花线与电弧线比值受基体成分影响大，不同分析线误差大
Ni	Cr	SiO_2，Mg 使 Ni 305.1nm 减弱（但 Ni 232.5nm 增强）	
Nb	C	SiO_2	Tl，P，Mo 延长其蒸发；C，Si 加速蒸发
Pb	Sn，SiO_2，碱金属	S，Fe，Mn 使 Pb 283.3nm 减弱；Ca，Mg 高 Pb 线减弱	Fe，Mn 高使 Pb 线变虚而宽； Sb 高延长 Pb 蒸发
P		Mg，碱金属	
Se	NH_4I，S		
Sb	大量 Pb，Zn，NH_4I	大量 Fe，SiO_2	Na 盐对 Sb 线有抑制，Cu 高 Sb 蒸发慢
Sn	S（PbS，ZnS，Fe_2S_3），K_2SO_4，NaCl	$CaCO_3$，SiO_2	

续表

受影响的元素	造成谱线增强的元素（或化合物）	造成谱线削弱的元素（或化合物）	其他影响
Sr	KCl，NaCl，C		C可减弱其影响
Ta	AgCl，C		C粉使基体元素提前蒸发，使Ta得到富集
Te	NH_4I，S		
Ti		大量Mg	加C粉Ti线出现多
Tl			K_2SO_4，Li_2CO_3抑制CN带，提高Tl灵敏度
U	$PbCl_2$，AgCl，Ga_2O_3		$BaCO_3$：C＝3：7与样品1：1混合，灵敏度略有提高
V	C粉使火花线增强，K，Na使原子线增强		火花线与电弧线比值受基体成分影响大
W	PbS，SiO_2，AgCl	Ca，Fe	NaCl使W蒸发受抑制，W的氧化物易挥发，当被还原成金属W或WC时则难挥发
La	C，Al_2O_3，TiO_2		
Y	C，Al_2O_3，TiO_2		
Yb	Mo，U，Ti，Cr，C		
Zn	Sn，AgCl，S，Fe		碱金属，Ca对Zn有抑制；Mn，Ca干扰Zn线
Zr	AgCl，C		

5. 缓冲剂

为了消除试样组成对谱线强度的影响，常在粉末试样中加入光谱缓冲剂以抵偿试样组成变化的影响。光谱缓冲剂的主要作用是稀释试样，控制电弧的放电特性，促进试样有规律的蒸发，且对所有化合物具有最小的基体效应。常用的光谱缓冲剂见表2-15。

表2-15 常用的光谱缓冲剂[8]

分析元素	类型	缓冲剂混合物（w/%）	内标元素	样品＋缓冲剂
Ag	1	$80C+20Li_2CO_3+0.03Sn+0.02Ge$	Sn，Ge	
	2	$90SiO_2+10NaF+0.04CdO$	Cd	
	3	$50K_2SO_4+30S+20SiO_2+0.015In_2O_3$	In	2＋3
	4	$50ZnO+45SiO_2+5NaF+0.4Cdo$	Cd	1＋6
Au	1	$100C+0.02Pt+0.1Pd$	Pt，Pd	
	2	$90C+10SrSO_4+0.015Pt$	Pt	
	3	$20C+79SiO_2+0.5PbO+0.4Sb_2O_3+0.1Pt$	Pt	
B	1	$100C+0.1Be$	Be	
	2	$52K_2SO_4+40ZnO+8AgCl+0.1SnO_2$	Sn	1＋2
	3	$44K_2SO_4+37ZnO+4AgCl+15$空矿$+0.25SnO_2$	Sn	1＋20
	4	$50Na_2CO_3+25Al_2O_3+25Sb_2O_3+2SnO_2$	Sn	1＋3
Be	1	$75C+25SrSO_4+0.7BaCO_3$	Ba	
	2	$70C+26SrSO_4+2Li_2CO_3+2CO_2O_3$.	Co	
	3	$70CuO+30C$	Cu	
	4	$30C+20NaF+25CaF_2+16CuO+7SnO_2+2Bi_2O_3$	Sn，Bi	
	5	$65CuO+35C+0.6BaCO_3$	Ba	1＋20 1＋50
	6	$84CaF_2+9NaF+5CdO+2Sb_2O_3$	Sb	1＋2
	7	$32SrSO_4+64C+2LiCO_3+2CoO_3$	Co	1＋30 1＋50
	8	$50BaCO_3+30C+20Na_2(B_4O_7)$	Ba	1＋3
Bi	1	$95C+5Na_2CO_3+0.03Sb_2O_3$	Sb	
As，Sb，Bi	1	$67Zn+5S+5C+22$空矿$+1SnO_2$	Sn	2＋3
As，Sn，Sb，Bi	1	$66NaSiO_4+17C+17Ag+0.02PbO$	Pb	1＋2
Al	1	$80C+20SrCO_3$	Sr	
	2	$78C+20SrCO_3+2Y_2O_3$	Y	
Ca，Mg，Fe，Al，Ti	1	$83C+17BaCO_3$	Ba	1＋2

续表

分析元素	类型	缓冲剂混合物（w/%）	内标元素	样品+缓冲剂
Mg，Fe，Al，Mn，Cr，Si	1	$96C+2CuO+0.5Y_2O_3+1.5La_2O_3$	Cu，Y，La	1+2
Ga	1	$56C+33SiO_2+10NaCl+1SnO_2$	Sn	1+3
Ga，Ge	1	$100NaCl-0.005Sn$	Sn	
	2	$99Sb_2O_3+1SnO_2$	Sn	
	3	$100CdS+0.003Sn+0.3Bi$	Sn，Bi	
Ga，Ge，In，Tl	1	$78Sb_2S_3+10C+4NaCl+5CbS+3SnO_2$	Sn	
	2	$30SnO+34SiO_2+12K_2SO_4+5NaF+5Li_2CO_3+13LiF+1Bi_2O_3$	Sn，Si	1+2
In	1	$48C+48Sb_2O_3+3NaCl+SnO_2$	Sn	
	2	$82NaF+15C+3SnO_2+0.5Bi_2O_3$	Bi	1+2
	3	$50SiO_2+50NaF+0.01Bi_2O_3$	Bi	1+1
Ge	1	$65ZnO+32S+1.2SbS+0.85SnO_2+0.6CuO+3PbO+0.3Bi_2O_3$	Sb	1+3
	2	$38.5ZnO+30S+30Li_2CO_3+0.5SnS+0.5Sb_2S_3+0.5Bi_2O_3$	Sb，Bi	2+1
	3	$50S+20C+20SiO_2+10NaCl+0.35Bi_2O_3+1.5SnO_2$	Bi，Sn	1+4
In，Ge	1	$40S+20NaF+20C+20SiO_2+0.1Bi_2O_3$	Bi	1+1
In，Tl	1	$98NaF+2Bi_2O_3$	Bi	1+1
Tl	1	$95PbCl_2+5NaCl+0.1In$	In，Na	
	2	$43Sn+43SiO_2+13K_2SO_4+0.7Sb_2O_3$	Sb	1+2
Li	1	$45C+45K_2SO_4+10Cs$	Cs	
	2	$100K_2SO_4+0.01In_2O_3$	In	
	3	$50K_2SO_4+50SiO_2$	K	1+3
	4	$28KCl+22NaCl+50C$	K	2+3
Li，Rb，Cs	1	$60KCl+20K_2SO_4+20$ 空矿	K	3+5
	2	$50K_2SO_4-50NaCl$	K	1+1
Rb，Cs	1	NaCl		
	2	K_2SO_4		1+1
	3	$33K_2SO_4-33NaCl+34C$		
Pb	1	$50SiO_2+40C+10Li_2CO_3+0.3Bi_2O_3+0.03SnO_2$	Sn，Bi	
	2	$20C+40Na_2CO_3+40SiO_2+0.25CdO$	Cd	
	3	$50Na_2SO_4+50C+0.3Bi_2O_3$	Bi	1+3
P	1	$99ZnO+1Sb_2O_3$	Sb	3+2
F	1	$50CaCO_3+50C$	背景	1+1
Sr	1	$100C+0.25Cr_2O_3$		1+6
Sr，Ba	1	$50C+50NaNO_3+0.4Cr_2O_3$	Cr	
	2	$100C+0.4Sm$	Sm	
	3	$45C+45SiO_2+4NaSiO_4+4K_2SO_4+2Sm_2O_3$	Sm	1+20
Pt，Pd，Rh，Ru，Ir，Os	1	$75C+25SrSO_4+0.05Ru+0.03Zr$	Ru，Zr	
	2	$85PbO_2+15Bi(OH)_2NO_3$	Bi	
	3	$80Fe_2O_3+20C+0.3Bi_2O_3$	Bi	
Pt，Pd	1	$98C+2NaCl+0.02CoNO_3$	Co	
	2	$100C+0.01Lu_2O_3+0.03La_2O_3$	Lu，La	
La，Ce，Gd，Eu，Tm，Y，Lu	1	$85C+15BaCO_3+3Y_2O_3+0.1Lu_2O_3$	Y，Lu	
	2	$85C+15BaCO_3+0.01Sc_2O_3$	Sc	
Y，Yb，La，Ce，Pr，Nd	1	$56C+44CaCO_3+0.02Sc_2O_3$	Sc	1+3
	2	$84C+16CaCO_3+0.02Sc_2O_3$	Sc	1+3
稀　土	1	$20SrO+20Al_2O_3+60C+0.02Sc_2O_3$ (ErO)	Sc(Er)	2+1
	2	$5LiF+10K_2SO_4+85C+0.5Sc_2O_3$	Sc	1+4
	3	$20BaO+80C+0.3Sc_2O_3$	Sc	1+4
	4	$48C+47SiO_2+5NaF+0.04Sc_2O_3$	Sc	
	5	$92C+5CdCl_2+3CuO$		1+6
Mo	1	$80C+20Cr_2O_3+0.025HfO$	Hf	
	2	$90C+10BaO+0.02ThO_2$	Th	
	3	$8SiO_2+10KCl+10CuO+0.4V_2O_5$	V	1+9
Mo，V	1	$66Zn+6S+6C+22$ 空矿 $+1Cr_2O_3$	Cr	2+3

续表

分析元素	类型	缓冲剂混合物（w/%）	内标元素	样品＋缓冲剂
V	1	100C+0.05Co	Co	
Nb	1	100C+0.2Mo_2O_3	Mo	
	2	100C+0.5Co_2O_3	Co	
Nb，Ta	1	80C+20Cr_2O_3+0.05HfO+0.01WC	Hf，W	2+1
	2	100C+0.025HfO+0.1WC		1+9
Sc	1	75C+25$SrCO_3$+0.5La_2O_3	La	
	2	70C+30$SrSO_4$+0.2Sm_2O_3	Sm	
	3	90C+10$BaCO_3$+0.3Er_2O_3	Er	
	4	20SrO+20Al_2O_3+60C+0.3Er_2O_3	Er	
	5	20BaO+80C+1Er_2O_3	Er	1+4
U，Th	1	85C+15$BaCO_3$+0.1Lu_2O_3	Lu	
	2	100PbCl+0.2V_2O_5	V	
Th	1	20SrO+20Al_2O_3+60C+0.1MoC	Mo	2+1
	2	20BaO+80C+0.05MoC	Mo	1+9
Sn	1	50K_2SO_4+25C+25ZnO+6Sb_2O_3	Sb	
	2	30NaF+7C+63SiO_2+1.5GeO_2	Ge	
	3	50C+50$CaCO_3$+0.3Sb_2O_3	Sb	
	4	92K_2SO_4+8Sb_2O_3	Sb	1+3
	5	70C+15Na_2CO_3+15Sb_2O_3	Sb	1+8
Zn	1	21As_2O_3+21Li_2CO_3+58C+0.15CdO	Cd	1+5
	2	40SiO_2+40K_2SO_4+20Sb_2O_3	Sb	1+4
Zr，Hf	1	80C+20Cr_2O_3+0.05MoO_3	Mo	
	2	80C+20Cr_2O_3+0.15W	W	
Zr	1	80C+20Cr_2O_3+0.05Hf	Hf	
	2	100C+0.1MoC	Mo	
Hf	1	80C+20Cr_2O_3+0.05Nb_2O_5	Nb	
	2	5BaO+95C+0.02Nb_2O_5	Nb	
Te	1	38I+50SiO_2+12CaF_2+0.3Bi_2O_3	Bi	3+5
Sn，Pb，Mo，Cu，Ag	1	66K_2SO_4+34SiO_2+0.05CdO+0.01GeO_2	Cd，Ge	1+2 2+3
	2	50K_2SO_4+50Fe_2O_3+0.05CdO+0.01GeO_2	Cd，Ge	1+1
Ti，V，Mn，Co，Ni	1	8$CaCO_3$+20As_2O_3+66C+1Ga_2O_3+5CuS	Ga	1+3
Co	1	70SiO_2+15C+15Li_2CO_3+0.005Rh	Rh	1+2

6. 发射光谱分析的检出限及改善检出限的途径

检出限是指用特定的分析方法，可以可靠检出的分析物的最小量或最小浓度，前者称为绝对检出限，后者称为相对检出限。元素检出限的高低与元素性质，样品组成，仪器性能和分析条件等密切相关，只有这些条件都确定后，元素的检出限才是一个可比较的参数。

实际工作中，为改善发射光谱分析的检出限，可采用如下途径：

①减小分析信号和背景的随机噪声；

②采用适当的内标元素和内标法，以减小和补偿非随机噪声；

③提高净分析信号强度或减小背景强度，使信背比增大；

④增大校正曲线斜率和检测器的相对响应因子，使分析信号和背景噪声的相对影响较小；

⑤对样品中分析物进行预富集，可使元素检出限大大降低。

表 2-16 为各种发射光谱分析法的检出限，表 2-17 为激光显微光谱分析的检出限及干扰限，表 2-18 为元素分析线、灵敏度与干扰谱线表。

表 2-16 各种发射光谱分析法的检出限

元素	直流电弧[1]		铜火花[1]		石墨火花[1]	火焰原子发射光谱[2]		激光法[3]	空心阴极[4]	火焰原子荧光[4]		激光火花法[5]		ICP-AES[1]		MIP-AES[1]	
	nm	%	nm	ng	ng	nm	μg·ml⁻¹	ng	%	nm	μg·ml⁻¹	nm	%	nm	μg·ml⁻¹	nm	μg·ml⁻¹
A[illegible]			533.23	25						396.1	0.02						
Ag	328.07	0.0005		200	0.5	328.07	1	3		328.2	0.005	328.07	0.005	328.07	0.001		
Al	396.15	0.001	394.40	15	2	396.15	1	250	0.0025	396.15	0.01	309.27	0.03	396.23	0.007	396.15	0.03
As	234.98	0.003	286.04	500	100	278.02	100	500	0.0015	257.6	4.0	237.54	0.1	193.70	0.002	228.81	4
Au	242.80	0.003	267.59	20		267.59	100	15			2	267.59	0.1	242.79	0.002		
B	249.77	0.003	249.77	10	0.3	249.77	0.5	5	0.0002	249.67	0.3	249.73	0.001	249.67	0.002	249.67	0.03
Ba	455.40	0.0003	585.14 614.28	100 10		413.27	50			553.6	0.002	455.40	0.01	493.41	0.001	455.40	[illegible]
Be	234.87	0.0001	313.04	0.3		313.11	0.02	5		234.9	0.1	313.04	<0.001	313.04	0.001		
Bi	306.77	0.0003	306.77	20	5	306.77	5	2		223.1	2.0	306.77	0.01	223.06	0.004		
C	247.85	0.1										247.86	0.05				
Ca	422.67	0.001	393.37	10		393.42	5			422.7	0.0001	317.93	0.01	317.93	0.003		
Cd	326.11	0.001	274.85	300	20	326.10 361.05	100 100	1		326.1	2.0	326.11	0.3	226.50	0.0005	228.80	0.5
Ce	320.92	0.01	401.24 418.66	100 50		394.27	50			418.66	10	256.03	0.03	413.38	0.007[1]	418.66	20
Co	345.35	0.001	230.85	70	5	345.35	3	25	0.00014	345.4	0.05	345.35	0.02	228.6	0.001	345.35	
Cr	425.43	0.001	284.32	5	1	284.32	2	10	0.0014	425.5	0.005	283.56	0.003	206.1	0.0003		
Cs	852.11	0.001	852.11	50		852.11	15				0.8[1]						
Cu	324.75	0.0001		100[1]	0.5	324.75	0.6	6	0.0002	324.7	0.01	327.40	0.001	324.7	0.0007		
Dy	404.60	0.01	400.05	50							0.07[1]	353.17	0.1		0.004[1]		
Er	400.8	0.01	390.63	50							0.07[1]	337.27	0.05		0.001[1]		
Eu	420.51	0.001	381.97 397.20	5 2							0.0002[1]				0.001[1]		
F	529.12	0.1	355.67	10													
Fe	371.99	0.0005	358.12 438.35	100 50	3	259.94	2.5	50		372.0	0.05	259.94	0.003	259.94	0.05	371.99	0.5
Ga	287.42	0.001	294.36	100		294.36 403.29	10 10			417.2	0.01	294.36	0.05		0.014[1]		
Gd	364.62	0.01	376.84 376.84	50 10							4.0				0.007[1]		
Ge	265.12	0.0003				303.91	10	15		265.2	0.5	303.91	0.1				
Hf	313.47	0.003	367.75 409.30	200 50		368.22	1			368.22	75[1]	263.87	0.01	339.98	0.01[1]		
Hg	253.65	0.01	253.65	500	10	253.65	50			253.7	10	254.1	0.1		0.2[1]		
Ho	410.38	0.01	389.10	100											0.01[1]		

续表

元素	原子发射光谱法														ICP AES		MIP AES	
	直流电弧		高压火花		石墨火焰	火焰多孔杯电极法		激发源	直流等离子体	火焰发射法		激光火花法					
	nm	%	nm	ng	%	nm	μg·ml⁻¹	ng	%	nm	μg·ml⁻¹	nm	%	nm	μg·ml⁻¹	nm	μg·ml⁻¹
I			380.10	25		325.61	10				0.1[?]			178.28	0.2~0.9[?]		
In	451.13	0.001	325.61	100	10		0.15	1.5		451.1	0.005	325.61	0.01		0.03[?]		
Ir	263.43	0.01	263.92	500					0.4	380.0	100	313.33	0.3		5[?]		
K	766.49	0.001	766.50	10		404.41	200	100			0.00005[?]	404.67	1	766.5	0.035		
La	394.91	0.01	394.91	5		394.91	5			408.67	0.1[?]	333.75	0.03	[illegible]	0.002[?]		
Li	670.78	0.0001	670.78	0.2		670.78	0.1	1			0.00002[?]	323.26		670.7	0.13[?]		
Lu	261.54	0.001	339.71	200							1[?]				0.008[?]		
Mg	285.21	0.0001	285.21	1		279.55	0.01	10		285.2	0.005	279.55	0.001	279.1	0.007		
Mn	279.48	0.0003	257.61	3	0.3	259.37	2	5	0.002	403.1	0.005	257.61	<0.001	257.6	0.0015		
Mo	313.26	0.001	281.61	5					0.001	390.3	0.1	281.61	0.03	202.03	0.008		
Na	588.99	0.0001	589.59	10		330.23	35	50		589.5	0.0001	330.30	1	589.2	0.2		
Nb	309.42	0.003	316.34	20[?]					0.003	405.89	0.6[?]	309.42	0.01	405.89	0.01[?]		
Nd	430.36	0.05	401.23	50							0.7[?]	315.36	1		0.05[?]		
Ni	341.48	0.001	231.60	10	1	341.48	10	50	0.0012	341.5	0.03	341.48	0.1	231.6	0.001	352.45	0.5
Np			415.45	200													
Os	330.16	0.03									2[?]	305.87	0.?		0.15[?]		
P	253.56	0.03	253.56	2000	10	253.56	80	500		213.62	3[?]	255.33	0.3	178.28	0.025		
Pa			274.40 431.72	500 200													
Pb	283.31	0.0001	283.31 405.78	50 5		283.31	10	20		405.8	0.2	283.13	0.?	220.3	0.008	405.78	1
Pd	340.46	0.001	360.95	50		340.46	2			363.5	0.005	324.27	0.03		0.007[?]		
Pr	422.29	0.1	410.08 422.53	50 20							0.07[?]				0.05[?]		
Pt	265.95	0.001	306.47	2		265.94 306.47	130 130			265.9	3.0	265.94	0.1		0.08[?]		
Pu			370.91	300													
Ra			381.44	10													
Rb	780.02	0.001	780.02	20							0.005[?]			780.02	100~519[?]		
Re	346.47	0.001	488.95	200		346.05	10				0.2[?]			197.31	3.8~8.4[?]		
Rh	343.49	0.001								369.2	0.9	343.49	0.03		0.003[?]		
Ru	343.67	0.01				349.89	100			372.8	0.3	343.67	0.1		5[?]		
S														182.04	0.010		
Sb	259.81	0.001	259.80	500	10	259.81	100	100		259.8	50	259.81	0.01	206.8	0.008	259.81	0.6

续表

元素	发射光谱法														ICP—AES[12]		MIP—AES[13]	
	直流电弧[?]		铜火花[?]		石墨火花[?]	火花多孔杯电极法[?]		蒸发法[?]	间接光谱法[?]	火焰发射法[3]		激光火花法[9]					
	nm	%	nm	ng	ng	nm	μg·ml⁻¹	ng	%	nm	μg·ml⁻¹	nm	%	nm	μg·ml⁻¹	nm	μg·ml⁻¹
Sc	424.68	0.0002	424.73 424.73	1 0.5							0.3[?]	391.38	0.001	361.38	0.00008		
Se	206.28	0.3								204.0	25			196	0.003		
Si	288.16	0.0005	288.16 288.16	20 10				50	0.0017	251.6	5.0	288.16	0.001	288.16	0.004		
Sm	426.27	0.05	426.65 428.08	50 20							0.5[?]	359.26	0.1		0.03[?]		
Sn	284.00	0.0002				283.99	100	10	0.0014	284.0	0.3	303.41	0.01	189.99	0.004		
Sr	460.73	0.0005	346.46	50		407.77	0.5			460.7	0.0002	346.45	0.1	421.55	0.0005		
Ta	331.12	0.01	268.51	100	10					301.25	18[?]	300.42	0.01	301.25	0.07[?]		
Tb	432.65	0.03									0.03[?]				0.2[?]		
Te	238.58	0.01	238.52	50		238.58	1000			238.6	200			214.28	0.0005[10]		
Th	287.04	0.01	401.91 401.91	50 20		283.06	100			401.91	150[?]	287.04	0.05	401.91	0.003[?]	401.91	5
Ti	308.80	0.001	376.13	10	3	334.99	5	500	0.0004	365.0	0.2	334.94	0.001	334.94	0.0002	334.94	[illegible]
Tl	377.57	0.001			50					535.1	0.02			190.8	0.008		
Tm	313.13	0.01	379.58	5							0.004[?]				0.007[?]		
U	286.57	0.05	385.96 385.96	500 100						359.0	10[?]	295.66	0.3	409.01	0.03[?]		
V	318.54	0.001	309.31	5	1	309.31	5	500	0.0006	437.9	0.01	310.23	0.003	292.4	0.001	437.92	0.1
W	294.44	0.01	400.87	50	10	400.87	500			400.89	0.5[?]	289.65	0.1			400.88	0.2
Y	437.49	0.001	371.03 371.03	10 1		371.03	0.1			371.03	0.05[?]	324.23	0.003	371.03	0.0005		
Yb	328.94	0.0001	369.42	10								328.94	0.003				
Zn	213.86	0.001	334.50	200	10	328.23 334.50	25 5	100		213.9	50	334.50	0.1	206.2	0.0008	213.86	0.1
Zr	339.19	0.001	339.20 414.92	50 10	1	349.62 357.30	2 2		0.0013	343.82	3[?]	339.20	0.01	339.19	0.0015	343.82	15

本表参考文献：

1 多田格三，水池敦．图解痕量分析．1971，7：193

2 留家鼎，吴子亿．发射光谱分析常用手册．1982

3 中国地质科学院情报所编．山梨稀土元素与其电子等发射光谱分析资料选编．1978：57

4 朱建中，徐根宝．理化检验．1975，（2）：11

5 下坂敏一郎，原口纮炁主编．ICP发射光谱分析．1987：136，158

6 [illegible] A. S. [illegible] Analyst, 1965, 90：223，235，205

7 [illegible] M. [illegible] Emission Spectroscopy. 1973，272，271，425

8 Akbar M., Golightly D. W. 感耦等离子体在原子光谱分析法中的应用．1993：130，257，254

9 李维刚．发射光谱分析．1983：155

10 北京瑞利分析仪器公司7502型ICP光谱仪样本

11 法国JY公司仪器样本

12 美国TJA公司仪器样本

13 美国TJA公司仪器样本

表 2-17 激光显微光谱分析的检出限及干扰限[9]

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ag	224.6412 Ⅱ	10.36	7	
	224.8740 Ⅱ	10.55	≥10	
	227.9982 Ⅱ	11.13	10	
	231.7033 Ⅱ	10.77	10	
	232.0246 Ⅱ	11.05	5	
	232.4677 Ⅱ	10.18	7	
	233.1370 Ⅱ	10.36	10	
	235.7920 Ⅱ	10.68	7	
	235.886 Ⅱ	16.29	7	Ru 235.7917 7
	236.218 Ⅱ	15.80	10	
	236.4001 Ⅱ	15.80	7	
	241.1350 Ⅱ	10.55	5	
	241.318 Ⅱ	10.18	3	
	242.964 Ⅱ	15.81	7	
	243.7791 Ⅱ	9.93	0.1	Ni 243.7888 7
				Mn 243.7914 5
	244.793 Ⅱ	10.77	7	
	276.7523 Ⅱ	10.18	7	
	288.220 Ⅱ		7	Tb 288.2014 10
				Mo 288.2378 7~10
	328.0683 I	3.78	0.005	Mn 328.0756 7
				Rh 328.055 5
	338.2891 I	3.66	0.007	Cr 338.2683 0.1
				Tb 338.280 2
Al	226.3453 I	5.48	0.5	
	236.7062 I	5.22	0.7	
	237.3362 I	5.24	0.3	
	263.1553 Ⅱ	15.32	0.5	
	265.2489 I	4.66	0.3	Mn 265.2485 3
				Sb 265.2606 5
	266.0393 I	4.66	3	
	281.6179 Ⅱ	11.82	0.05	Mo 281.6154 0.02
	305.0079 I	7.65	7	Cr 305.0137 0.07
	305.4697 I	7.65	7	Zr 305.484 0.1
	305.7154 I	7.66	7	Ta 305.712 10
	305.905 I	7.65	10	
	306.4304 I	7.65	7	
	306.6162 I	7.65	7	Ti 306.6220 0.07
	308.2155 I	4.02	0.005	Tb 308.236 0.5
				Th 308.2176 7
				Mo 308.2220 5
				V 308.2523 5
	309.2713 I	4.02	0.003~0.005	
	358.6908 Ⅱ	15.30	1	
As	228.812 I	6.77	3~5	Co 228.8018 7~10
	234.984 I	6.59	1	Mo 234.989 5
	236.967 I	7.55	7	
	237.077 I	7.55	10	
	238.118 I	6.56	10	
	245.653 I	6.41	7	Rh 245.6180 7~10
	274.4991 I	6.77	5	Cr 274.4591 3
				W 274.5028 3
				Co 274.5100 7
	278.0197 I	6.77	0.5	Mo 278.0036 1
				Nb 278.0245 1
				Cr 278.0299 1~2
	286.0452 I	6.59	1	Hf 286.0313 1
As	289.871 I	6.59	5~7	Cr 289.8536 0.1
				Mn 289.8693 2~3
				Hf 289.8709 3
	295.970 Ⅱ		10	
	311.663 Ⅱ	15.07	10	Fe 311.6590 150
				V 311.6476 7
				Th 311.6476 7
				Tb 311.6288 2
Au	242.795 I	5.10	0.2	Mn 242.798 0.05
	264.149 I	5.82	7	
	267.595 I	4.63	0.05	Nb 267.5944 3
				Ta 267.5901 2
				Eu 267.605 0.05
	258.763 Ⅱ	10.62	10	
	258.871 I	7.26	10	
	274.826 I	5.64	0.5	
	280.206 Ⅱ	13.40	0.5	
	282.545 I	8.06	3~5	
	290.706 Ⅱ	14.39	3	
	291.354 I	9.27	0.3	Ni 291.359 7
				Pt 291.354 3
	299.028 I	7.82	1	Ho 299.027 2
				Nb 299.0258 3
	299.482 Ⅱ	13.40	3~5	
	302.9205 I	5.22	3	
	312.2781 I	5.10	0.3	Ti 312.2895 0.5
	I	8.99		
				Er 312.256 0.03
				Sc 312.2542 1
				Th 312.2962 2
	323.0636 Ⅱ	14.5	1	Er 323.0585 0.01
				Ho 323.057 5
				Sm 323.0544 ≥10
				Mn 323.0712 7
B	243.229 Ⅱ		≥10	Fe 243.2267 70
				Co 243.2214 1
				Ir 243.1938 5~7
	249.6778 I	4.96	0.1~0.2	Fe 249.6533 15
	249.7733 I	4.96	0.1	
	317.9351 Ⅱ	21.76	0.5	Ca 317.9332 0.005
				W 317.9435 ≥10
	345.141 Ⅱ	12.69	0.3	pd 345.135 0.5
Ba	225.4732 Ⅱ	6.19	3	
	230.4235 Ⅱ	5.98	0.2~0.5	
	233.5269 Ⅱ	6.00	0.07~0.1	
	234.7577 Ⅱ	5.98	3	Hf 234.7444 10
				Co 234.739 1
	263.4783 Ⅱ	7.39	10	
	307.1591 I	4.04	1	Nb 307.156 3
				Cr 307.1572 1~2
	350.1116 I	3.54	0.7	Ni 350.0852 5
Be	234.8610 I	5.28	0.005	
	249.4559 I		0.03	
	249.4576 I	7.68	0.03	
	249.4733 I	7.68	0.03	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Be	265.0470 I	7.40	0.005	Fe 265.0492 150h
	265.0550 I	7.40	0.005	
	265.0702 I	7.40	0.005	Mn 265.0994 7
	265.0781 I	7.40	0.005	Mn 265.1165 5
	298.609 I	10.61	1	
	313.0416 II	3.95	0.0001	V 313.0627 0.05
				Ce 313.0344 1
				W 313.0456 7~10
				Ir 313.0578 5
				Ta 313.0578 7~10
	313.1072 II	3.95	0.0003	Er 313.107 5
				Mn 313.0800 0.05
				Tm 313.126 0.03
	332.134 I	6.45	0.01	Tb 332.115 0.1
				Mo 332.1196 10
				V 332.1538 5
				Ti 332.1700 0.07
				Th 332.1453 5
				Sm 332.1184 10
Bi	222.8251 I	5.55	7	
	223.0608 I	5.55	≥10	
	227.6578 II	5.45	3	
	262.7906 I	6.12	10	
	289.7975 I	5.69	0.5	Nb 289.7812 0.5
				Pt 289.787 5
				V 289.790 3~5
	293.8298 I	6.13	3~5	V 293.8254 7~10
	298.929 I	5.55	1	Ru 298.8948 ≥10
				Sc 298.895 0.05
				Lu 298.927 7
				Cr 298.9194
	299.3342 I	5.55	5	Mo 299.3515 5
				W 299.3611 1
	302.4635 I	6.00	1	Hf 302.4603 7
				Cr 302.4350 0.3
				Nb 302.4738 0.5
				W 302.4920 5~7
	303.518 I	8.19	7	
	306.7716 I	4.04	0.01	Mo 306.7642 5
				Th 306.7734 1
	307.6662 I	5.43	7	
	339.7213 I	5.55	5	Lu 339.707 0.005
	351.0853 I	5.43	10	Ti 351.0841 0.07
				Ta 351.104 7~10
	359.6110 I	6.12	≥10	Ti 359.6052 2
				Ru 359.6179 5
				Rh 359.6194 1~2
				Tb 359.638 0.7
C	229.689 II	18.08		
	247.8573 I	7.69		
	250.911 II	18.67		Fe 250.9122 50
	251.203 I	18.66		
	251.171 II	18.67		Fe 251.1759 100
	280.131 II			Mn 280.1064 0.7
				Sc 280.1312 0.3
				V 280.193 3
	283.6710 II	16.34		
	283.7602 II	16.34		
Ca	279.163		7	Ta 279.1370 5~7
				Fe 279.1462 20
				Mo 279.1540 7~10
				Tm 279.162 7~10
	279.715		3~5	Tm 279.7269 5
	294.920 I		1	V 294.917 5
	299.7314 I	6.02	5	Mo 299.735 0.5
				Cu 299.736 7
	299.9641 I	6.01	5	
	300.6858 II	6.02	5~7	
	300.921 I	6.01	5	
	313.6003 I	5.83	≥10	Ta 313.5893 3~5
	315.8869 II	7.05	0.01	
	317.9332 II	7.05	0.005	B 317.9351 ≥10
				W 317.9425 ≥10
	318.0516 I	5.74	0.2	Fe 318.0226 300
				Nb 318.0290 0.05
				Cr 318.0701 0.2
	335.036 I	5.58	≥10	
	336.1918 I	5.58	>10	
	337.268 II	33.73	>10	Nb 337.2562 5
	364.4765 I	5.30	1	V 364.4706 ≥10
	370.603 II	6.47	0.2	
Cd	226.517 II	5.47	1	
	228.802 I	5.41	7	As 228.812 5
	230.661 I	9.17	≥10	
	231.284 II	11.14	3	
	232.115 II	11.12	5	Hf 232.114 1
	232.9282 I	9.27	10	
	257.293 II	10.28	5	
	274.858 II	10.28	1	
	325.033 II	9.28	7	
	326.1057 I	3.80	0.5	
	340.3653 I	7.37	1	Zr 340.3684 7~10
				Cr 340.3322 0.1
	346.6201 I	7.37	0.3	Fe 346.6500 70
	346.7656 I	7.37	1	Ni 346.7502 5
	361.0510 I	7.37	0.05~0.1	Mn 361.0299 3
				Ni 361.0462 5
	361.2875 I	7.37	1	
Ce	260.359 II		7	Ta 260.357 1
	303.156 II	6.09	5	Fe 301.1215 150
				Fe 301.3639 200
	305.559 II	6.31	3~5	W 305.5397 ≥10
				Nb 305.5522 1
	305.6777 II		7~10	Ta 305.6615 5
				V 305.6334 5
				Lu 305.672 0.02
				Ti 305.6740 3
	306.3010 II	4.94	1	Th 306.3026 3
				Nb 306.3130 10
				V 306.3247 0.1
				Cu 306.3415 10
	312.1281		10	V 312.1145 0.01
				Co 312.1415 5
	313.0334 II		1	V 313.0267 0.05
				Be 313.0416 0.00001
				Ho 313.028 1

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ce				Ta 313.0578 7
	313.0872 Ⅱ		3	Eu 313.074 7
				Nb 313.0786 0.01
				Ti 313.0800 0.1
	314.6400 Ⅱ	4.23	10	
	314.7555 Ⅱ	6.23	≥10	
	314.8463 Ⅱ		10	
	319.4825 Ⅱ	4.48	10	
	320.1714 Ⅱ	4.72	3～5	Mo 320.1500 5
	321.8944 Ⅱ	4.70	5～7	Tb 321.893 0.05
	322.7114 Ⅱ		10	
	323.4274 Ⅱ		7	Cr 323.406 0.07
				Tb 323.450 5
				Os 323.4196 ≥10
				Ti 323.4516 0.005
	327.1151 Ⅱ		10	Fe 327.1002 300
				Mo 327.0904 5
	327.2253 Ⅱ	4.19	3～5	Ti 327.2080 0.2
				Zr 327.2222 3
	342.2507 Ⅱ		7	Fe 342.2493 10
	348.2420 Ⅱ		10	
	351.7380 Ⅱ	4.43	5	Dy 351.758 2
				Mo 351.7557 ≥10
				Nb 351.7671 2
	353.9086 Ⅱ	3.82	10	
	356.0798 Ⅱ	4.22	5	Nd 356.0729 1
				Yb 356.0727 0.5
				Os 356.0798 5
				Co 356.0893 0.5
	357.7458 Ⅱ	3.97	0.5～1	
	362.3843 Ⅰ	4.21	7	Mo 362.350 7
				Mn 362.3792 ≥10
	365.5851 Ⅱ	3.70	1	Mo 365.5788 5
	366.0641 Ⅱ		10	
	366.7981 Ⅱ	3.73	7	
Co	226.001 Ⅱ		10	
	228.6156 Ⅱ	5.84	0.3	
	223.2877 Ⅰ		10	
	229.1455 Ⅰ		1	
	230.7857 Ⅱ	7.60	0.5	
	231.1604 Ⅱ	5.92	0.5	
	231.364 Ⅱ		7	
	231.4054 Ⅱ	5.97	0.3～0.5	
	231.498 Ⅱ	6.00	1	
	231.5760	5.83	7	
	232.432 Ⅱ	7.60	0.7	
	232.5615 Ⅰ	5.84	0.7～1	
	232.648 Ⅱ	5.74	1	
	233.0350 Ⅱ		5	Ta 233.079 ≥10
	233.6241 Ⅱ		7	Os 233.650 1
	234.112		3	
	234.2418		10	
	234.4260 Ⅱ		0.1	
	234.660		5	
	234.739 Ⅰ		1	Hf 234.7444 10
				Ba 234.7577 1
	235.342 Ⅰ		0.5	
	236.0509		5	
	236.3787 Ⅰ	5.74	0.3	
Co	237.8622 Ⅱ	5.62	0.2	
	238.346 Ⅱ		0.5	
	238.6363 Ⅱ		0.5	
	238.8915 Ⅱ	5.60	0.05	
	238.9540 Ⅰ		1	Fe 238.8627 30
	239.7388 Ⅱ	6.38	0.5	W 239.7091 1
	239.837		7	
	240.454		0.5	
	240.7668 Ⅱ		0.5	
	240.8750 Ⅱ	5.76	1	
	241.4063 Ⅱ		0.5	Nb 241.4211 5
	241.6896 Ⅱ		2～3	
	241.765 Ⅱ	5.62	1	Fe 241.7866 100
	242.0726 Ⅱ		0.5	Rh 242.0979
	242.3621 Ⅱ		7	
	243.2214 Ⅱ	5.20	1	B 243.279 ≥10
				Fe 243.2267 70
				Ir 243.1936 5～7
	243.6979 Ⅱ		3	
	243.9046 Ⅰ	5.30	10	Ho 243.933 7
				Fe 243.9300 100
	244.776		0.7～1	Fe 244.7708 100
				Fe 244.7747 80
	245.0004 Ⅱ		2	Fe 244.9960 30
	246.4195 Ⅱ		3	Fe 246.4007 80
				Hf 246.419 1～2
	246.706		10	
	250.6462 Ⅱ	6.16	0.2	V 250.6220 7
	250.7676 Ⅰ	5.52	7	
	251.1016 Ⅰ	5.36	0.5	Nb 251.1005 5～7
				Fe 251.0834 50
				Ni 251.0873 3
	251.9822 Ⅱ	6.24	0.3	
	251.4965 Ⅱ	6.31	0.1～0.2	
	252.8967 Ⅰ	5.00	0.07～0.1	V 252.8836 5
				Fe 252.9080 70
	253.0133 Ⅰ	5.48	1	Fe 253.0106 30
	253.381 Ⅱ	7.92	5	
	254.1938 Ⅱ	6.20	0.5	
	255.9407 Ⅱ	6.24	0.03～0.5	
	256.009		0.5	
	256.4036 Ⅱ	6.16	0.07～0.1	
	257.4862		5	
	258.0326 Ⅱ	6.02	0.05	Os 258.0026 3
				Nb 258.0285 5
	258.2241 Ⅱ	6.20	0.1	Fe 258.2985 80
	258.3176		3	
	258.7221 Ⅱ	6.12	0.1	
	260.6122 Ⅰ	5.38	1～2	Hf 260.6372 2
	261.4361 Ⅱ	6.94	0.5	
	261.9802 Ⅰ	5.36	5	Fe 261.9076 50
				Lu 261.926 1
	262.8761		10	Ta 262.885 10
	263.2239 Ⅱ	6.94	1～2	Ta 263.227 10
				Fe 263.2236 60
				Mn 263.2352 1
	263.239 Ⅱ	6.94	1～2	Nb 263.2516 5
	264.8635 Ⅰ	5.11	1	Ru 264.8635 ≥10
	265.3703 Ⅱ		3	Yb 265.375 1
				Mo 265.334 0.7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Co				Cr 265.3586 0.3
				W 265.3567 10
	266.3529 I	5.87	0.3	Pb 266.3166 1
				V 266.3248 5
				Cr 266.3678 0.07
	269.4680 I	5.92	0.7~1	Ta 269.4759 3
	287.124 I		3	Mo 287.1508 0.1
	295.474 I	6.27	1	Ti 295.4476 1
				Fe 295.4655 70
	298.7162 I		2	Fe 298.7292 200
	298.9588 I	4.15	7	
	304.4005 I	4.07	0.7	
	306.1819 I		5	
	307.2344 I	4.21	5	Ti 307.2107 0.02
				Tb 307.2120 2
				Er 307.252 0.1
	308.2844 I	5.90	7	Al 308.2155 0.003
				Ta 308.2536 10
				V 308.2523 5
				Mo 308.2822 5~7
	308.6777 I	4.24	5	
	308.9595 I	4.13	7	Ti 308.9001 0.07
				Ta 308.958 0.2
	309.8196 I	4.18	10	
	312.1415 I	3.97	7	V 312.1145 0.1
	312.1566 I	4.07	7	
	313.6726 I	3.95	≥10	Mo 313.6412 2
				Fe 313.6499 40
				V 313.6514 0.1
				Cr 313.6680 0.1
	313.7327 I	4.18	7	
	313.9943 I	4.05	5	
	314.5021 I	5.72	≥10	Tb 314.522 3~5
				Cr 314.5103 7~10
				Dy 314.5222 3~5
				Hf 314.5319 5
				V 314.5324 3~5
	314.7064 I	4.12	3	
	315.4678 I	5.97	0.5	Th 315.4370 1
				Nb 315.4815 3
	324.3842 I	5.70	2	Dy 324.378 5
				Fe 324.3724 100
				Mn 324.3780 5
	325.4206 I	5.69	2	Fe 325.4363 150
				Ti 325.4250 0.01
				Nb 325.4067 0.5
	331.4076 I	6.62	5	
	331.9478	6.66	3	
	332.6991	6.65	5	
	333.3388 I	4.23	2	
	335.4377 I	4.21	1	Ti 335.4635 0.1
	336.7109 I	4.12	0.5	Nb 336.6956 5
				Pr 336.716 5
	338.5224 I	4.18	1	Er 338.5087 0.03
				Dy 338.5027 0.01
				Ho 338.505 5
	338.8173 I	5.89	0.7	Ti 338.7837 0.01
				Zr 338.7872 3
				Zr 338.8209 1
				Nb 338.7928 10

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Co	339.5375 I	4.23	0.3	Cr 339.561 0.7
				Er 339.5280 1
				Mo 339.5360 10
	340.5120 I	4.07	0.03	Zr 340.4832 3~5
				Yb 340.5160 5
	340.9177 I	4.15	0.1	Nb 340.919 2
	341.2339 I	4.15	0.05	Ho 341.286 10
				Rh 341.227 7
	341.5783 I	5.83	5	
	341.7160 I	4.12	0.3	Ti 341.696 10
	343.1575 I	3.17	1	
	343.3040 I	4.24	0.1	Nd 343.2985 10
				Cr 343.3311 0.2
	344.2926 I	3.78	1	
	344.3641 I	4.12	0.1	Fe 344.3878 200
	344.6388 I	5.38	5	
	344.9170 I	4.18	0.07	
	344.9441 I	4.03	0.07	
	345.3505 I	4.02	0.003	Ho 345.313 0.2
				Tm 345.361 1
				La 345.3168 1
				Eu 345.347 0.05
	345.5234 I	3.82	5	
	346.2809 I	4.21	0.07	Zr 346.2017 5
				Th 346.2855 7
				W 346.3032 7
	346.5800 I	3.57	0.2	Fe 346.5862 400
	347.4022 I	4.15	0.07	Sb 347.3915 3
				Mn 347.4044 1
				Ho 347.425 0.1
	348.3410 I	4.07	1~2	Zr 348.3539 5
	348.5366	6.67	0.7	Pt 348.5267 5~7
				Fe 348.5342 50
				Er 348.5169 0.7
	348.9402 I	4.48	0.07~0.1	
	349.5687 I	4.18	0.2	Hf 349.5748 3
				Mn 349.5819 3~5
				Mn 349.5839 5
	350.1725 I	5.74	0.7	
	350.2279 I	3.97	0.05	Rh 350.252 0.7
	350.6315 I	4.05	0.1	
	351.2641 I	4.11	0.07	Dy 351.2563 2
				Nd 351.2909 3~5
				Ce 351.2988 ≥10
	351.3480 I	3.62	0.3	
	351.8349 I	4.57	0.2	
	352.1567 I	3.95	0.2	V 352.1839 7
	352.3434 I	4.15	0.1~0.2	Tb 352.366 0.1
	352.6849 I	3.51	0.3	Fe 352.6675 50
				Nb 352.6625 5
	352.9033 I	3.68	0.7	
	352.9813 I	4.03	0.05	Fe 352.9820 80
	353.3358 I	3.73	1	Fe 353.3202 50
	354.3259 I	5.38	3	V 354.3500 1
	355.0595 I	3.66	7	Dy 355.0228 0.03
	356.0893 I	4.11	0.5	Os 356.0798 5
				Nd 356.0729 1
				Yb 356.0727 0.5
				Ce 356.0798 5
	356.4951 I	4.06	7	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Co	356.9379 I	4.40	0.05	Hf 356.9041 0.7
	357.5361 I	3.56	0.5	
	358.7190 I	4.50	0.05～0.1	
	359.4872 I	3.62	1	Fe 359.4636 100
				Dy 359.5046 3
	360.2084 I	3.65	1	
	361.1701 I	5.75	7～10	
	362.7808 I	3.93	1	
	366.2161 I	5.66	0.7	La 366.2073 1
				Ti 366.2273 0.05
	367.6554 I	6.24	0.7	
	368.4479 I	5.44	0.5	
Cr	265.3586 I		0.3	Yb 265.3753 1
				Mo 265.3349 1
				W 265.3567 10
				Co 265.3703 3
	265.8592 II		0.1	
	266.1728 II		5	Hf 266.1875 5
	266.3679 II		0.07	Co 266.3529 0.3
				Pb 266.3166 1
				V 266.3248 5
	266.6021 II		0.07	Hf 266.5966 7
	266.8712 II		0.1	
	267.1809 II	6.15	0.5	Mo 267.1834 10
				Nb 267.1931 1～2
				V 267.1004 1
	267.2831 II		0.5	Mn 267.2586 2
				W 267.2669 ≥10
				Mo 267.2834 0.5
	267.7159 II	6.18	0.007	Mn 267.7246 ≥10
	267.8792 II	6.13	0.2	V 267.8568 3
				Zr 267.8632 1～2
				Ru 267.8758 5
	268.709 II	6.12	1	
	268.8042 I	5.63	3	V 268.7956 0.1
				Mo 268.7993 0.5
	269.1041 II	6.16	0.1	V 269.0786 3
				Mn 269.0977 7
	269.750		3	Fe 269.7462 50
				V 269.7745 7
	269.8409 II		0.1	Mn 269.8378 10
	269.8686 II		0.1	Er 269.8392 2
				V 269.8378 10
	270.3856 II		3	Fe 270.3989 100
	271.2307 II	6.08	2	Fe 271.2388 100
				Hf 271.2425 3
	271.7509 II		5	
	272.2749 II	6.05	2	Zr 272.2610 3
				V 272.2558 2
	274.2030 II	6.02	3	
	274.3643 II	6.00	1～2	
	275.0728 II	6.02	0.07	
	275.1871 II	6.03	0.1	
	275.7723 II	6.00	0.1	
	276.2593 II	6.02	0.02	
	276.6540 II	6.03	0.007	Rh 276.654 ≥10
				V 276.6455 5
	277.8060 II	9.40	3	Rh 277.815 7
				Fe 277.8221 80
Cr	278.5700 II	8.62	2	
	279.2164 II	8.62	2	
	280.0771 II	8.61	0.1	Ti 280.061 7
				Zn 280.0869 7
				Mn 280.1064 0.7
	281.2006 II	8.58	0.2	
	281.8359 II	8.56	2	
	282.2371 II	8.16	0.07	Ru 282.2552 ≥10
				W 282.2572 7
				Hf 282.2677 3
	283.0468 II	8.14	0.07	Pt 283.0295 3～5
	283.4262 II		5	Mo 283.4394 7
	283.5633 II	5.93	0.007	Fe 283.5459 100
	283.8786 II	9.11	5	Er 283.8714 3～5
				Os 283.8626 0.7～1
	284.0021 II	8.12	0.07	Ti 283.980 7
				Sn 283.9989 0.07
	284.3252 II	5.90	0.007～0.01	Ta 284.351 7
				Fe 284.3632 100
	284.9838 II	5.86	0.01	
	285.1356 II	8.09	0.05～0.1	Ti 285.1102 5
				Hf 285.1206 5
	285.3218 II	8.10	3	Mo 285.3229 0.1
	285.5676 II	5.84	0.01	Fe 285.5670 200
	285.7402 II	6.79	1～2	
	285.8911 II	5.89	0.01～0.02	
	286.0934 II	5.82	0.07	Os 286.0956 7～10
				Hf 286.1012 1～2
				Nb 286.1093 1
				Fe 286.0498 50
	286.2571 II	5.86	0.007～0.01	
	286.5107 II	5.84	0.01	Fe 286.5973 50
	286.6742 II	5.82	0.03	Fe 286.6629 80
				Mo 286.6693 1
	287.0436 II	6.77	0.1	Th 287.0413 3
				V 287.0547 7～10
	287.5993 II	6.79	0.05	
	287.7978 II	5.84	3	V 287.7688 5
				Sb 287.7915 1
	288.0869 II	6.76	2	Ho 288.099 0.7
	289.8536 II		0.1	As 289.871 7
				Mn 289.8693 2～3
				Hf 289.8709 3
	292.1817 II	8.11	1	
	292.3684		2	V 292.3620 3～5
				Fe 292.385 70
	293.0853 II	7.94	5	V 293.0806 0.07
				Ti 293.0261 5
	293.2705 II		5	Nb 293.2662 10
				Th 293.252 1
				In 293.2624 1
				Ta 293.2303 3
	293.3970 II		3	Ta 293.3550 70
	293.4493 I		5	Mo 293.4299 0.5
				Dy 293.4529 3
				V 293.4401 2
	297.1906 II	7.94	0.05	Mo 297.1906 5
	297.9741 II	7.92	0.1	Ho 297.963 0.5
				Fe 297.9352 100
				Nb 297.9878 1

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Cr	298.5325	II	7.00	0.1	Nb 298.5049 5
					V 298.5170 5～7
					Fe 298.5550 300
	298.6473	I	5.18	0.1	
	298.9194	II	7.89	0.1	Ru 298.8948 ≥10
					Bi 298.9029 1
					Lu 298.927 7
					Os 298.9127 0.5
	299.6580	I	5.12	0.5	
	300.5057	I	5.15	3	
	301.3713	I	5.08	5	
	301.4760	I	5.08	5	Ho 301.461 3
	301.4915	I	5.09	0.03	V 301.4823 0.07
					Dy 301.5074 10
	301.5194	I	5.07	3	Dy 301.5074 10
					Sc 301.5364 0.5
	301.5510	II	8.52	3	Tm 301.529 0.5
	301.7596	I	5.11	0.1	Dy 301.773 1～2
	302.1558	I	5.13	0.05	Mo 302.1617 7
	302.4350	I	5.08	0.5	Fe 302.4033 200
					Hf 302.4603 7
					Th 302.4669 ≥10
					Bi 302.4630 1
					Nb 302.4738 0.5
					W 302.4920 5～7
	303.2927	II	6.79	5	Dy 303.318 7
	303.4190	I	5.09	5	V 303.3822 0.07
					Th 303.4069 5
					Sn 303.4121 0.05
	304.0846	I	5.08	0.05	Os 304.0900 5
					Mn 304.0603 7
					Mo 304.101 10
	305.0137	II	8.37	0.7	Al 305.0079 7
	305.3880	I	5.09	0.1～0.2	Nb 305.0637 5
					V 305.089 1
					Ho 305.099 2
	307.7831	II	7.14	5	Mo 307.7661 1
					Lu 307.760 0.005
					Os 307.7720 5
	311.8652	II	6.40	0.05	Os 311.8328 10
					V 311.8383 0.02
					Lu 311.843 7～10
					Ho 311.851 0.5
	312.0371	II	6.41	0.03	Fe 312.0434 80
	312.4978	II	6.42	0.01	Ge 312.4817 5
					V 312.5284 0.01
	313.2058	II	6.44	0.005	Hg 313.1546 5
	313.6680	II	6.41	0.1	Mo 313.6412 5
					Mo 313.6465 5
					V 313.6514 0.1
					Co 313.6726 ≥10
	314.5103	II		7～10	Tm 314.489 1
					Co 314.5021 ≥10
					Fe 314.5057 25
					Tb 314.522 3～5
					Dy 314.5222 3～5
					Hf 314.5319 5
					Nb 314.540 0.1
	314.7227	II	6.42	0.1	Tb 314.704 1
Cr	315.5149	I	6.91	0.5	
	318.0701	II	6.44	0.05	Fe 318.0755 100
	318.3325	II	8.30	3～5	Dy 318.3196 10
					V 318.3406 0.1
	319.7079	II	6.42	0.05～0.1	
	320.8590	II	6.41	5～7	V 320.8352 3
					Fe 320.8475 5～7
					Dy 320.871 5～7
					Dy 320.881 5～7
					Mo 320.8834 0.5
					Nb 320.8858 5
	320.9183	II	6.41	0.1	Mo 320.8834 0.5
					Fe 320.9297 125
	321.7400	II	6.40	0.5	Ti 321.7060 0.01
					Hf 321.7305 7
					Fe 321.7380 125
	323.406	II	8.12	3	Ce 323.427 7
	329.1762	II	8.06	5～7	Nb 329.1726 7
					Fe 329.1023 125
	329.561	II	7.93	3	Co 329.5375 0.1
	336.804	II	6.16	0.05	Mo 336.797 0.5
	340.2399	II	6.75	5	Fe 340.2262 150
					Tb 340.233 2
					Ti 340.2422 5
					Sm 340.246 5
					Zr 340.2523 7
	340.3322	II	6.75	0.1	Cd 340.3653 1
					Zr 340.3684 7～10
	340.8765	II	6.11	0.05	Mo 340.8634 5～7
					Nb 340.8678 0.5
	342.119	II	6.04	0.05	
	342.2739	II	6.07	0.1	Fe 342.2660 50
					Mo 342.2777 1
	343.3311	II	6.04	0.1～0.2	Co 343.3040 0.1
					Pd 343.3449 0.5
					Ni 343.3558 0.7
	351.0538	I	6.53	7	
	351.1836	II	5.01	0.5	
	355.063	I	6.68	3	
	357.8687	I	3.46	0.001～0.002	
	359.3488	I	3.44	0.005	V 359.3344 0.5
	360.5333	I	3.43	0.005	Fe 360.5458 150
	363.9802	I	5.94	2	
	364.1470	I	5.94	5	
Cs	293.111	II	19.55	>10	
	347.688	I	3.54	>10	
	348.013	I	3.54	>10	
Cu	222.5697	I	5.57	10	
	224.2613	II	8.78	7	
	224.6995	II	8.23	5	
	236.9887	II	8.48	5	
	250.6270	II	13.42	10	V 250.6220 7
					Co 250.6462 0.2
	254.480	II	13.38	1	Nb 254.480 0.5
	261.8366	I	6.12	1	
	271.8775	II	13.67	≥10	Hf 271.851 7
					Fe 271.8435 60
	282.4369	I	5.78	0.5	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Cu	296.1165 I	5.57	1	Fe 296.1281 40
				Mo 296.1320 5
	303.6104 I	5.72	7	
	306.3415 I	5.69	10	Th 306.3026 3
				Nb 306.3130 10
				V 306.3247 0.1
	310.8605 I	8.82	7	V 310.8701 7
	320.8234 I	5.50	7	
	322.3435 I	9.09	10	Nb 322.333 0.05
	322.4664 I	9.09	10	
	323.5713 I	9.07	3	
	324.3164 I	8.92	3	
	324.7540 I	3.82	0.003	Nb 324.7474 1
				Mn 324.7542 3
	327.3962 I	3.78	0.007	Nb 327.3886 1
				Sc 327.3619 0.03
	327.9816 I	5.42	5	
	329.0544 I	8.84	7	Th 329.059 0.7
				V 329.0238 10
				Mo 329.0823 2
	333.7844 I	5.10	5~7	La 333.7488 0.2
Dy	293.4529		3	Mo 293.4299 0.5
				V 293.4401 2
				Cr 293.4517 7
				Er 293.4517 7
	297.582		7~10	Ta 297.5568 10
				Mo 297.5614 2
				Er 297.5679 2
				Hf 297.5883 0.5
	301.230		7~10	Ni 301.2004 0.7
				Hf 301.220 0.5
	301.5074		10	Ho 301.461 3
				V 301.4823 0.07
				Cr 301.4915 0.03
	301.696		5	V 301.6784 1
	302.9826		3	Fe 302.9149 100
				Ti 302.9730 1
				Sb 302.9807 1
	303.318		7	Cr 303.2927 5
	303.8291		2	Mn 303.8503 5
	304.3144 Ⅱ		2	Mn 304.3356 10
	304.9133		10	Th 304.9095 5
				V 304.8892 5
	305.2324		7	Mo 305.2320 7
				Ta 305.2534 7
	306.0653		1~2	V 306.0460 2
				Mo 306.0777 7
	306.2620 Ⅱ		1	Os 306.2192 ≥10
				Fe 306.2233 400
	307.1920 Ⅱ		10	Ti 307.2107 0.02
				Er 307.252 0.1
				Tb 307.260 1
				Hf 307.2877 5
	307.3542 Ⅱ		3	V 307.3823 5
				Tm 307.365 0.2
	307.835		5	Fe 307.843 50
				Ti 307.8645 0.02
	310.219		3	V 310.2299 0.001
	310.3839		5	Ti 310.3804 0.05
Dy	310.5001		5	Ti 310.5084 0.1
				Fe 310.5168 60
	310.9768 Ⅱ		1~2	Ho 310.993 7
	312.203		10	Er 312.189 7~10
				Mo 312.1999 0.5
	313.568 Ⅱ		0.7~1	
	314.0645 Ⅱ		2	Hf 314.0763 5~7
	314.113 Ⅱ	3.94	5	
	314.3831 Ⅱ		3~5	Ti 314.3756 0.7
	314.5222		3~5	Co 314.502 ≥10
				Cr 314.5103 7~10
				Mo 314.5268 ≥10
				Tb 314.5286 3~5
				Hf 314.5319 5
				V 314.5242 3~5
				Nb 314.540 0.1
	314.6165 Ⅱ		7	V 314.6230 3
	315.652 Ⅱ		0.5	
	316.2824 Ⅱ		1	Ti 316.2570 0.003
				Hf 316.2611 2
				Fe 316.2800 100
				Th 316.2836 10
	316.9978 Ⅱ		1	
	317.7531		3	Fe 317.7535 300
	318.3196		10	Cr 318.3325 3~5
				V 318.3406 0.1
	318.4777 Ⅱ		10	Fe 318.4896 150
	318.6375 Ⅱ		10	Os 318.6402 10
				Ti 318.6454 2
	318.7676 Ⅱ		7~10	Mo 318.7529 2~3
				Ho 318.7708 1
				V 318.7708 0.05
				Er 318.7785 1~2
	320.546		5	Fe 320.5400 200
				V 320.5582 3
	320.640 Ⅱ		2	Nb 320.6343 0.1
				Ta 320.6386 7
				W 320.6406 3
	320.710 Ⅱ		5	Fe 320.7089 50
	320.881		5~7	Fe 320.8475 80
				Nb 320.8585 5
				Cr 320.8590 5~7
				Mo 320.8834 0.5
	321.2684		7	V 321.2434 3~5
				Mo 321.3189 5~7
				W 321.326 0.7
				Ho 321.3570 3
				Mn 321.2884 10
	321.663 Ⅱ		0.5	Cr 321.656 1
				Th 321.6628 0.7
				Ho 321.667 2
				Y 321.6682 0.05
				Ta 321.6933 5
	322.150 Ⅱ		2	Ce 322.1170 5
				Th 322.1293 0.3
	322.329 Ⅱ		3	Er 322.3308 3
				Nb 322.3324 3
	322.508 Ⅱ		7	Th 322.5359 5
	323.590 Ⅱ		1	Fe 323.6223 200
				Th 323.5843 5

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Dy	323.663		3～5	Ti 323.6573 0.0007
				Mn 323.6778 1～2
				Tm 323.6797 0.3
	323.959		7	Fe 323.9436 300
				Sm 323.9638 ≥10
				Ti 323.966 0.07
				V 323.9834 10
	324.0878		5	Sm 323.9638 ≥10
				V 323.9834 10
				Zr 324.1046 5
	324.378		5	Fe 324.3724 60
				Mn 324.3780 5
				Co 324.3842 2
	325.1260 Ⅰ		0.5	Fe 325.1235 150
				Sc 325.132 0.5
	325.219 Ⅱ		2	V 325.1870 1
				Ti 325.1991 0.07
				Tb 325.234 0.5
	325.625 Ⅱ		1	Im 325.6090 0.005
				Mn 325.6137 5
				Mo 325.6210 7
				Th 325.6473 7
	326.6207 Ⅰ		1	Tb 326.640 3
	328.010 Ⅱ	3.88	1	Hf 327.998 3
				Fe 328.0216 150
				Tb 328.0216 0.3
				Er 328.022 1
				Th 328.0374 5
				Ti 327.9995 5
	328.279 Ⅱ		1	Th 328.2610 10
				Th 328.2671 2
				Zr 328.2834 1
				Fe 328.2892 80
				Mo 328.2909 7
	328.934		5	Mo 328.9015 5
				Yb 328.937 0.005
				Mo 328.938 10
				V 328.9389 3
	329.1119		7	Tm 329.100 0.1
				Nb 329.1059 7
				Mo 329.0823 2
				Fe 329.0989 80
	330.547		3～5	Zr 330.5152 5
				Nb 330.5609 5
	330.889 Ⅱ		0.5	Ti 330.8806 1
	331.2729			Er 331.2424 0.03
				Nb 331.2600 3
				Sc 331.2736 0.5
	331.331		5	Sc 331.3539 0.1
				Mo 331.3624 3
				Th 331.3650 0.7
	331.6325 Ⅱ		3	Tm 331.617 7～10
				Os 331.6688 ≥10
	331.9887 Ⅰ		0.5	Nb 331.9584 3
				Ho 331.987 0.7
	332.642		3	W 332.6190 5
				Ir 332.6403 5
				Zr 332.6414 5
				Nb 332.6619 7
				Ti 332.6765 0.1

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Dy	334.188 Ⅱ		7	Nb 334.1974 0.5
				Er 334.1836 5
				Ti 334.1875 0.0005
	335.3595		3	Sc 335.3734 0.003
	335.507		5	Fe 335.3229 100
	336.8116 Ⅱ		2	Mo 336.7969 1
				Cr 336.9054 0.05
	337.176		3	Mo 337.1692 5
				Ni 337.1993 7
				Tb 337.150 1
	338.5027 Ⅰ		0.01	Ho 338.505 2～3
				Er 338.5087 0.02
				Co 338.5224 1
	338.8863 Ⅱ		3	Ti 338.8755 5
	339.3583 Ⅱ	3.76	0.03	Tb 339.358 10
				Cr 339.3839 0.2
	339.6169 Ⅱ		0.5	Er 339.605 1
	340.780 Ⅱ	3.63	0.01～0.02	Fe 340.7461 400
				Hf 340.7759 2
	341.3794		0.5	Hf 341.374 10
				Tb 341.376 0.7
	342.257		1～2	Tb 342.244 1
				Cr 342.2739 0.1
				Mo 342.2777 5
				Fe 342.2660 50
	342.506 Ⅱ		3	Fe 342.5015 40
				Tm 342.508 0.01
				Ho 342.535 0.3
	342.9442 Ⅱ		7	
	343.4373 Ⅱ	3.06	0.7～1	
	343.527		10	Mo 343.540 5
	343.591		2	Cr 343.6187 2
	343.8952		5	Yb 343.8720 2～3
				Yb 343.8840 2～3
				Mo 343.8871 7
				Th 343.8953 5
				Mn 343.8974 10
	344.094 Ⅱ		1	Th 344.0019 5
				Fe 344.0991 5
	344.1453 Ⅱ	3.70	7～10	Pd 344.1396 0.5
				Tm 344.151 0.1
	344.5582 Ⅰ	3.60	0.5	
	344.7001 Ⅰ		1	
	345.4326 Ⅰ		0.5	Nb 345.397 3
	345.6566 Ⅱ		0.7	Mo 345.6387 7
				Ti 345.6390 0.7
	346.0971 Ⅰ	3.58	0.03	Pd 346.0774 0.3
				Nd 346.816 0.5
				Th 346.822 10
				Nd 346.8420 1
	347.7074 Ⅰ		0.7	Ti 347.7182 0.5
	349.4135		0.05	
	349.867		0.3	Nb 349.8629 5
	350.4522 Ⅱ		2	Mo 350.4413 5
				V 350.444 0.01
	350.5457 Ⅰ		2	Mo 350.5315 7
				Zr 350.5485 0.5
				Ho 350.442 2
	351.2563		2	Co 351.2641 0.1
				La 351.2917 7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Dy	351.7270 Ⅱ		2	Ce 351.7380 5
				Mo 351.7557 10
				Nb 351.7671 2
	352.403		0.1	Fe 352.407 40
	352.461		7	Ni 352.4501 0.01
				Mo 352.4646 3
				V 352.4715 5
				Er 352.4920 1～2
	353.1712 Ⅱ	3.50	0.003	Ho 353.174 5
				Mn 353.1848 1
	353.4963 Ⅱ	3.60	0.2	
	353.6024 Ⅱ		0.05	Tm 353.621 0.3
	353.8523 Ⅱ	3.50	0.02	Th 353.875 3
	354.2333 Ⅱ		0.5	Fe 354.2178 100
	354.4211 Ⅱ		0.7	
	354.6841 Ⅱ	3.60	0.5	Ti 354.6039 10
	355.0228 Ⅱ		0.03	Co 355.0595 7
	356.3154 Ⅱ	3.58	0.3	Mo 356.3138 7
	356.3699 Ⅱ		0.5	Mo 356.3755 10
	357.3838 Ⅱ		1	Ti 357.3737 7
				Mo 357.8882 7
	357.6250 Ⅱ	4.06	0.5	Mo 357.6174 2
				Sc 357.6340 0.003
	359.5046 Ⅱ		0.7	Co 359.4872 1
	360.034		1	Y 360.0734 0.01
	363.078		0.7	Sc 363.074 0.002
	364.5416 Ⅱ	3.50	0.01	Sc 364.5311 0.01
				La 364.5414 0.2
				Pr 364.5539 0.5
Er	267.0255 Ⅱ		3～5	Sb 267.0643 5
	269.8392		1～2	V 269.8378 7～10
				Cr 269.8409 0.1
	275.9204		2	Cr 275.9391 3
	279.2524		2	Nb 279.3048 1～2
	283.8714 Ⅱ		3～5	Os 283.8626 0.7～1
				Cr 283.8786 5
	287.8913		7	Mo 287.9043 1
				W 287.9047 10
				Hf 287.9112 10
	289.6960 Ⅱ		5～7	Fe 289.6262 200
	290.4467 Ⅱ		0.5	
	291.0357 Ⅱ		0.05	Ho 291.035 2
				V 291.0398 0.3
				Nb 291.0587 0.3
	293.4517		7	Mo 293.4299 0.5
				V 293.4401 2
				Cr 293.4493 5
				Dy 293.4529 3
	294.5280 Ⅱ		3	Ti 294.547 1
	294.6615 Ⅱ		2	Mo 294.6690 1
				Nb 294.6898 3
	295.007		5～7	Fe 295.0243 300
				V 295.0348 1
				La 295.0492 2～3
				Hf 295.0670 5～7
	296.4518 Ⅱ		0.03	Fe 296.4639
	297.2279		7	V 297.2254 1～2
				Nb 297.2572 0.2
				Fe 297.2279 40
Er	297.5679 Ⅱ		2	Mo 297.5404 2
				Ta 297.5558 10
				V 297.5652 5
				Hf 297.5882 0.5
	301.6838 Ⅱ		1～2	V 301.6784 0.5
	302.8278 Ⅱ		7	V 302.8043 7
				Cr 302.8125 0.3
				Nb 302.8443 0.2
	303.6222 Ⅱ		0.5	Cu 303.6104 7
				Zr 303.6393 5
	305.442 Ⅱ		1	Ni 305.4316 1
				Mn 305.4362 10
	307.0743 Ⅱ		0.5	
	307.252 Ⅱ		0.1	Co 307.234 2
				Tb 307.260 1
				Hf 307.2877 0.005
				Ti 307.2971 0.005
	307.3347 Ⅱ		1	Tm 307.3083 0.1
	309.919 Ⅱ		0.1	Nb 309.986 1
				Mo 309.924 1
	311.203		0.7	Ti 311.205 3～5
				Mo 311.2124 7
				Th 311.235 1
	311.3536 Ⅱ		0.5	Sc 311.3370 1
				Dy 311.3536 1
				V 311.3567 1
				Tb 311.3620 5
	312.189		7～10	Ti 312.1599 7
				Tb 312.194 7
				Th 312.1962 2
				Mo 312.200 0.5
	312.265		0.03	Sc 312.254 1
				Au 312.2781 0.1
				V 312.2895 0.5
	312.565		1	Fe 312.5654 300
				Hg 312.567 5
	313.107		5	Nb 313.0786 0.01
				Ti 313.0080 0.1
				Th 313.1070 7～10
				Tm 313.126 0.03
	313.2775 Ⅱ		0.03	Mo 313.2599 0.07
				Ta 313.2643 10
	313.849		3	Mo 313.8715 1～2
	314.180		0.7	Mo 314.1730 5
	314.363		0.3	Fe 314.3988 150
	318.1923 Ⅱ		0.1	
	318.7785		3	Ho 318.737 1
				Dy 318.7676 7～10
				V 318.7708 0.05
	322.3308 Ⅱ		0.5	Dy 322.329 3
				Nb 322.3324 3
	323.0585 Ⅱ		0.01	Ho 323.057 5
				Nb 323.0240 2
				Sm 323.0344 ≥10
				Mn 323.0712 7
				Au 323.064 10
	323.2026 Ⅱ		1	V 323.1950 7
				Os 323.2055 5
				Th 323.2123 2
				Ti 323.2280 0.07

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Er	323.7979 I		0.7	Mo 323.784 5
				V 323.7874 0.5
				Nb 323.8024 5
				Th 323.8118 2
	324.0484		3	Tm 324.0229 0.7
				Mn 324.0399 7
				Mo 324.0713 1
	324.9342 I		1	La 324.9351 0.5
	325.9048 II		0.3～0.5	Fe 325.9048 200
	326.280		1	Th 326.2671 2
	326.4781 II		0.02	Ho 326.477 5
	326.715 I		0.1	Mo 326.6887 5
				Os 326.7200 3
	326.9411 II		0.5	Os 326.9609 10
				Ge 326.9494 1
	327.932 I		0.3	Ti 327.8927 0.05
				Tb 327.904 1
				Ho 327.926 1
				Zr 327.9265 0.07
				Mo 327.940 10
	328.022 I		1	Ti 327.9995 0.7
				Dy 328.010 1
				Tb 328.0216 0.3
				Fe 328.0261 150
	330.4074		0.5	Mo 330.3657 5
	331.2424 II	3.80	0.03	Nb 331.2600 3
				Sc 331.2731 0.5
				Dy 331.2729 2～3
	331.3653		1	Mo 331.3624 3
				Th 331.3653 0.7
	331.6385 II		0.07	
	333.2703 II		0.07～0.1	
	333.779 II		3	La 333.75 0.2
				Cu 333.7844 5～7
	334.002 I		1	Cr 333.9804 0.1
				Ta 333.9910 3～5
				Mo 334.0167 10
	334.603 I		0.5	Zn 334.5572 1
	335.0255 II		0.05	
	336.409 I		0.05	Ho 336.426 5
	336.807 I	3.74	0.1	
	337.2750 II	3.67	0.005	Pt 337.2791 5
				Ti 337.2800 0.0005
				Pd 337.3001 0.5
	337.4170 II		0.2	Nb 337.4012 2
				Ho 337.426 1
				Tb 337.441 5
	338.1079		0.7	La 338.0910 0.07
				Nb 338.0938 1
	338.5087 II		0.03	Dy 338.5027 0.01
				Ho 338.505 5
				Co 338.5224 1
	338.9599		1	Ho 338.9595 2
				Th 338.9645 7
				Hf 338.9853 1
	339.1989		0.03	Mo 339.1851 5
				Zr 339.1975 0.01
				Ho 339.205 2
	339.5280		1	Nb 339.4975 5
				Hf 339.4983 1～2
Er				Co 339.5375 0.3
	339.605 II		1	Dy 339.6169 0.5
	340.1830 II		0.7	Zr 340.1796 ≥10
	340.8678		2	Nb 340.8678 0.5
	342.8394 II		1	Ho 342.813 0.5
				Ru 342.8329 3
				Hf 342.837 2
	343.8473		1	Zr 343.8230 0.03
				Hf 343.8235 5
	346.4536		1	Yb 346.437 0.5
				Sr 346.4457 0.02
	347.1714 II		0.5	
	347.9416 II		0.7	
	348.5860 II		0.7	Ho 348.586 2
	348.6828 II		1	Tm 348.708 1
	349.6860 II		1	V 349.7030 3
				Dy 349.7111 3
	349.9104 II	3.59	0.007～0.01	Ru 349.8942 0.1
				Ho 349.908 0.7
				Ti 349.9099 7～10
	350.8395		0.7～1	Mo 350.8115 7
				Ho 350.835 2
	354.9848 II		0.7	
	355.9902 II		0.5	Os 355.9786 5
	359.9829 II		0.03～0.05	
	360.5695		1	Fe 360.5458 150
	361.6573		0.5	
	363.3541 II		0.7	
	364.6782		0.7	
	369.2652 II	3.41	0.05	Mo 369.265 0.05
Eu	244.604 II		3	Co 214.60 0.5
	251.379 II		3	
	263.8764 II	4.85	7	
	264.126 II	4.69	7	Ti 264.1099 7
				Mo 264.115 7
				Hf 264.1406 1
	266.833 II	4.85	10	
	270.1125 II	4.59	10	
	271.697 II	4.81	10	
	272.7780 II	4.50	3	Ta 272.778 7
	272.939 II	4.54	10	Mo 272.9683 3
	280.286 I	4.63	1	Ti 280.2500 7
				V 280.2523 5
				Mg 280.2695 0.002
				Mn 280.2820 0.7～1
				Co 280.2844 7
	281.395 I	4.41	0.5	
	282.078 I	4.39	2	Rh 281.9626 7
	290.668 I	4.26	1	
	292.505 I	4.44	7～10	
	327.778 II	6.72	10	
	339.658 I	6.98	5	Zr 339.6733 10
				Rh 339.685 0.7
	352.109 II	6.77	1	
	354.388		1	
	368.779		3	Cd 368.776 3
	368.844 I	3.36	0.05	
	372.499 II	3.32	0.03	Tm 372.507 0.03
				La 372.505 0.07

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Fe	255.5442 Ⅱ		3	
	256.3474 Ⅱ	5.87	0.05	
	259.8369 Ⅱ	4.82	0.002	
	259.9396 Ⅱ	4.77	0.001	
	261.7616 Ⅱ	4.82	0.03	
	268.4751 Ⅱ	8.43	0.3	
	269.2597 Ⅱ	8.37	0.3	
	273.9546 Ⅱ	5.51	0.005	
	275.3287 Ⅱ	7.77	0.1	
	275.5737 Ⅱ	5.48	0.02	
	275.6264 Ⅱ	4.55	0.02	
	275.6329 Ⅱ	4.6'	0.02	
	302.0492 Ⅱ	4.19	1	
	302.0640 Ⅱ	4.11	1	
Ga	250.019 Ⅰ	5.06	1	
	265.9866 Ⅱ	4.66	2	
	270.047 Ⅱ	13.35	1	Rh 270.060 5
	271.9653 Ⅱ	4.66	3	
	278.015 Ⅱ	13.22	5	Nb 278.024 0.01
				Cr 278.030 0.005
	287.4244 Ⅰ	4.31	0.1	Fe 287.4172
				Ce 287.414 1
	294.3637 Ⅰ	4.31	0.05	Mo 294.3380 10
	294.4175 Ⅰ	4.31	0.5～1	Ho 294.450 10
				Fe 294.4398
				V 294.4571 0.07
Gd	262.812		0.7	Bi 262.791 0.1
				Cr 262.801 0.05
				Rb 262.813 0.1
				Pt 262.803 0.5
	265.559		1	
	267.941		1	
	271.730		1	Mo 271.736 0.1
	310.050 Ⅱ	4.24	1	
	333.1388 Ⅱ	3.71	3	
	333.213 Ⅱ	4.78	3	
	335.048 Ⅱ	3.85	1	
	336.071 Ⅱ	3.72	10	
	336.225 Ⅱ	3.77	1	
	336.425 Ⅱ		≥10	
	342.246 Ⅱ	3.86	0.5	
	366.1668		7	
	367.123 Ⅱ	3.46	5	
	367.407 Ⅰ	3.40	5～7	
	368.7759 Ⅱ	3.71	7	Nb 368.7971 0.1
				V 368.7069 0.1
Ge	241.7366 Ⅰ	6.01	7～10	
	259.2537 Ⅰ		1	
	265.1178 Ⅰ	4.85	0.1	Mn 265.0994 7
				Nb 265.1122 3
				Hf 265.1165 5
				Ta 265.1221 5
	265.1575 Ⅰ	4.67	0.5～1	Fe 265.1706 60
				La 265.171 5～7
				Yb 265.171 5
	269.1344 Ⅰ	4.67	0.7	Nb 269.1773 2
	270.9626 Ⅰ	4.64	0.5	Mn 270.9610 7
Ge	274.0431 Ⅰ		7	
	275.4592 Ⅰ	4.67	0.5	Nb 275.4522 10
				Mo 275.447 0.05
	279.3938 Ⅰ		≥10	
	284.548 Ⅱ	12.44	≥10	V 284.5245 7
	303.9064 Ⅰ	4.96	0.03～0.05	In 303.9356 0.01
	312.4817 Ⅰ	4.85	5	Cr 312.4978 0.01
	326.9494 Ⅰ	4.67	1	Os 326.9209 0.01
				Er 326.9411 0.5
				Th 326.9469 10
				Zr 326.9657 3
Hf	229.613 Ⅰ		7	
	232.114 Ⅱ	5.95	5	
	232.247 Ⅱ	5.34	7～10	
	233.733 Ⅰ		5	
	234.7444 Ⅱ	6.07	10	Ba 234.7577 3
				Co 234.739 1
	235.1215 Ⅰ	5.27	5	Pd 235.1338 10
	238.818		10	
	239.3262 Ⅰ	5.79	5	V 239.3575 ≥10
	239.383 Ⅰ	5.18	5	V 239.3575 ≥10
	240.5425 Ⅱ	5.94	3	
	243.356 Ⅰ	7.25	5	
	244.7254 Ⅰ	5.44	3	
	246.0493 Ⅱ	5.41	3	
	246.419 Ⅱ	6.07	1～2	Fe 246.401 80
				Co 246.420 3
	246.9179 Ⅰ	6.69	5	
	249.517 Ⅱ		1	
	251.140 Ⅱ		0.5	
	251.2689 Ⅱ		2	
	251.5156		3	
	251.6881 Ⅰ	5.30	1	Fe 251.7120 60
				Ti 253.1251 10
	253.1193 Ⅰ	5.50	7	
	255.140 Ⅰ		1	
	255.902		7	
	257.1670 Ⅰ	5.27	1	Zr 257.1391 0.7
				Th 257.1617 2
	257.1670 Ⅱ	5.27	1	Nb 257.1336 5
	257.3897 Ⅱ	6.31	3	
	257.6823 Ⅱ	5.85	3	Fe 257.6865 70
	260.6372 Ⅱ	5.13	2	Co 260.6122 1～2
				Ta 260.6543 7
	262.2738 Ⅱ	5.18	3	
	263.8710 Ⅱ	4.70	0.7～1	Nb 263.8592 2
				Ta 263.867 7
				Mo 263.8758 0.5
				Eu 263.876 0.05
	264.1406 Ⅱ	5.73	0.1	Mo 264.115 7
				Ti 264.1099 7
	264.7292 Ⅱ	5.72	0.5～0.7	Ba 264.7289 3
				Ta 264.7472 7
				Fe 264.7557 70
	265.1165 Ⅱ		5	Nb 265.1122 3
				Ta 265.1221 5
				Be 265.0781 5
				Ge 265.1178 0.1
				Mn 265.0994 7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Hf	265.7837 Ⅱ		7	Lu 265.780 0.3
				Nb 265.8027 5
				W 265.8037 2
	266.1875 Ⅱ		5	Cr 266.1728 5
	266.5966		7	Cr 266.6021 0.07
				Yb 266.608 3
	268.3353 Ⅱ	6.49	2	Mo 268.3231 0.5
				Rh 268.3563 10
	270.6727 Ⅱ		5	
	271.2425 Ⅰ	5.18	3	Cr 271.2307 2
				Fe 271.2388 100
	271.851 Ⅱ		7	Fe 271.8435 60
				Cu 271.8775 ≥10
	273.8760 Ⅱ	5.13	1	
	275.1812 Ⅱ	5.54	3	Ti 275.170 10
	275.6911 Ⅱ		7	
	277.3357 Ⅱ	5.25	0.1	Cr 277.331 0.02
	277.4016 Ⅱ	5.50	2	V 277.4276 5
				Fe 277.4691 50
				Th 277.4072 7～10
	281.3865 Ⅱ	5.20	5	
	281.4475 Ⅰ		2	Mo 281.4672 3
	281.4758		5	Mo 281.4672 3
	282.0224 Ⅱ	4.77	0.3	
	282.2677 Ⅱ	5.18	3	Cr 282.2371 0.07
				Ru 282.2552 ≥10
				W 282.2572 7
				Au 282.272 10
	284.9208 Ⅱ	5.85	1～2	Ho 284.910 2～3
				V 284.9050 7
	285.1206 Ⅱ	5.13	3～5	Ta 285.0985 3
				Ti 285.1102 5
				Cr 285.1356 0.1
	285.2012 Ⅱ	5.95	3	Mg 285.2129 0.007
				Fe 285.213 80
				Ta 285.2355 10
	286.1012 Ⅱ	4.33	1～2	Cr 286.0934 0.1
				Nb 286.1093 1
				Os 286.0956 7～10
	286.1696 Ⅱ	4.78	0.7～1	Ho 286.149 1
				Ti 286.199 7
	286.6373 Ⅰ	4.32	7	W 286.6373 5
				Fe 286.6629 80
	286.9825 Ⅱ		≥10	V 286.9961 1
				Zr 286.9811 7
				Ti 287.004 5
	287.6329 Ⅱ	6.18	1	Bi 289.7975 5
	289.8709 Ⅰ	4.57	3	Cr 289.8536 0.1
				As 289.871 7
				Mn 289.8639 2～3
	290.4408 Ⅰ	4.83	5～7	
	290.4519		5～7	I 290.4799 3～5
	291.6481 Ⅰ	4.81	3～5	Th 291.6440 10
	291.9594 Ⅱ	4.70	2	Ho 291.959 1
				Os 291.9794 7
				Th 291.9842 ≥10
				V 291.9992 2
	293.7795 Ⅱ	5.25	1	Fe 293.7811 150
	294.0772 Ⅰ	4.21	5	Ta 294.0215 7
				Fe 294.0591 80
Hf	295.0679 Ⅰ		5～7	V 295.0348 1
				La 295.0493 2～3
				Nb 295.0878 0.02
	296.7231 Ⅱ		1～2	Hg 296.7278 2
	296.8812 Ⅱ		1	Mo 296.8774 5
				Zr 296.8961 7～10
	297.5882 Ⅱ	4.77	0.5	Mo 297.5404 2
				V 297.5652 5
				Er 297.5679 2
				Dy 297.582 7～10
	297.7595		7	Nb 297.7681 1
				Mo 297.7765 5
	297.9280 Ⅰ		7～10	Ti 297.9199 5
				Fe 297.9352 100
				Ho 297.963 0.5
	298.0810 Ⅰ		7	Pd 298.052 3
	300.0096 Ⅱ	4.50	5	Mo 300.0232 0.5
	300.5557 Ⅰ	5.40	7	Yb 300.5765 0.5
				Nb 300.5767 5
	301.220		0.5	Ni 301.2004 0.7
				V 301.2015 10
				Dy 301.230 7～10
	302.4603		7	Cr 302.4350 0.3
				Bi 302.4635 1
				Nb 302.4738 0.5
				W 302.4920 5
	303.116 Ⅱ	4.70	0.7～1	Mn 303.1063 1
				Fe 303.1215 150
				Zr 303.1918 ≥10
	305.0758 Ⅰ	4.76	5～7	Tm 305.073 0.5
				V 305.0730 7
				Ho 305.073 2
				Ni 305.0819 0.1
	306.468 Ⅱ		5	Ho 306.419 1
				Nb 306.4533 0.3
				Ni 306.4623 5～7
				Pt 306.4717 0.5
	307.2877 Ⅰ	4.04	5	Tb 307.260 1
				Er 307.252 0.1
				Dy 307.292 10
				Ti 307.2971 0.005
	308.0845 Ⅱ	6.17	1	Ni 308.035 2
				Ni 308.0755 7
	309.2245		7	Mo 309.2074 2
				Sc 309.247 7
	310.1397 Ⅱ	4.78	3	Ni 310.1554 0.7
				Mn 310.1557 7～10
	310.9117 Ⅱ	4.77	0.7～1	Sc 310.9341 0.3
				V 310.9372 7
				Os 310.9381 7～10
	313.4718 Ⅱ	4.33	0.1	Nd 313.4897 7
				V 313.4931 0.1
	313.9653 Ⅱ		5～7	Tb 313.964 3
				Sc 313.9729 1～2
				V 313.9745 0.5
	314.0763 Ⅱ		5～7	Dy 314.0645 2
	314.5319 Ⅱ	3.94	5	Cr 314.5103 7～10
				Co 314.5021 ≥10
				Tb 314.522 3～5
				Dy 314.5222 3～5

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Hf				Mo 314.5288 ≥10
				Nb 314.540 0.1
	316.2611 Ⅱ		2	Ti 316.2570 0.003
				Fe 316.2800 100
				Dy 316.2824 1
				Th 316.2836 10
	317.6856 Ⅱ		1	Ho 317.696 1
	318.1153 Ⅰ		≥10	Fe 318.0775 100
	319.3526 Ⅱ		1	Fe 319.3228 70
	319.4193 Ⅱ		0.5	Mo 319.3973 0.3
				Nb 319.4275 0.03
	319.9994 Ⅱ		5	Sc 319.937 0.1
				Fe 319.9525 200
				Ti 319.9915 0.05
	321.7305 Ⅱ		7	Ti 321.7062 0.01
				Fe 321.7380 125
				Cr 321.7440 0.5
	322.0606 Ⅱ		1～2	Er 322.0730 0.3
				Ir 322.0780 0.7～1
	323.9438 Ⅰ		5	Th 323.9289 10
				Fe 323.9436 300
				Dy 323.959 7
				Ti 323.9664 0.07
				V 323.9834 10
	325.3702 Ⅰ		1	
	325.528 Ⅱ		5	Mo 325.5246 7
	326.2474 Ⅰ		7～10	Os 326.2290 2
				Tb 326.2671 2
	327.998 Ⅱ		3	Ti 327.9995 0.7
				Dy 328.010 1
				Tb 328.0216 0.3
				Er 328.022 1
				Fe 328.0261 150
				Ag 328.0683 0.002
	331.2865 Ⅰ		7	Mo 331.294 7
				Dy 331.304 5
	331.7988 Ⅱ		3	Ta 331.9928 7
				Ti 331.8025
	332.336 Ⅱ		3	Fe 332.3068 100
				Fe 332.3737 150
	332.8213 Ⅱ		5～7	Nd 332.8270 5
				Mo 332.8565 10
	335.2055 Ⅱ	4.73	1	Sc 335.2048 3
				Ti 335.2071 7
				Ho 335.208 2
	337.069 Ⅱ		5	Fe 337.0786 200
	338.9833 Ⅱ		1	Er 338.9599 1
				Mo 338.9799 7
				Tb 339.002 3
	339.4589 Ⅱ		3～5	
	339.4983 Ⅱ	5.84	1～2	Er 339.5290 1
	339.9795 Ⅱ	3.64	0.07～0.1	Nb 339.9711 5～7
	340.7759 Ⅱ		2	Fe 340.7461 400
				Dy 340.780 0.02
	341.0171 Ⅱ	5.50	1	Zr 341.0248 1
				Ho 341.025 0.5
	342.8366 Ⅱ		3	Ho 342.813 0.5
				Fe 342.8197 50
				Ru 342.8309 3
				Er 342.8394 1
Hf	343.8235 Ⅱ		5	Zr 343.8230 0.03
				Er 343.8473 0.7
	347.8990 Ⅱ		3	Nb 347.8778 2
				Yb 347.880 0.3
				Rh 347.8906 5
	347.9285 Ⅱ		1	Zr 347.9025 0.5
	348.757 Ⅱ		7	Tb 348.762 5～7
	349.5748 Ⅱ		3～5	Co 349.5687 0.2
				Mn 349.5859 5
	350.5227 Ⅱ	4.57	0.7	
	353.5545 Ⅱ	4.12	0.7	Nb 353.5301 0.5
				Ti 353.5412 0.7
				Tm 353.5520 0.5
				Sc 353.5729 0.01
	355.2696 Ⅱ		3	
	356.1664 Ⅱ	3.48	0.7～1	Ti 356.1575 7～10
				Tb 356.174 0.07
	356.9041 Ⅱ	4.26	0.7～1	Fe 356.8979 35
				Co 356.9397 0.05
	364.4355 Ⅱ	4.19	1	
	366.5346 Ⅱ		5～7	
	366.6775 Ⅱ		3	
	368.2236 Ⅱ	3.36	1～2	Fe 368.2209 300
	370.1148 Ⅱ		0.7～1	
	370.492 Ⅰ		0.5	
Hg	253.4775 Ⅰ	9.53	>10	
	253.6519 Ⅰ	4.88	3	
	284.783 Ⅱ		1	
	296.7278 Ⅰ	8.84	2	Fe 296.6900 600
				Hf 296.7231 1～2
	312.567 Ⅰ	8.85	5	Fe 312.5654 300
				Er 312.565 1
	313.1546 Ⅰ	8.82	2	Tm 313.126 0.03
				Os 313.1115 7
	365.0146 Ⅰ	8.86	1	Hf 365.053 3
				La 365.0170 0.7
				Fe 365.0032 30
Ho	243.933		7	Fe 243.9300 100
	281.200 Ⅱ		7	W 281.225 ≥10
	281.474 Ⅱ		2～3	Ta 281.4801 ≥10
				Mo 281.4672 3
	286.149 Ⅱ		1	Hf 286.1696 0.77
				Ti 286.199 7
	286.782		3	Ta 286.741 7
				Cr 286.7648 1
				Mo 286.8110 7
	288.099 Ⅱ		0.5～0.7	Cr 288.0896 2
	289.499 Ⅱ		0.7～1	Lu 289.484 0.007
				Fe 289.4778 80
	289.736		7	Fe 289.7262 200
				Mo 289.7421 5
	290.083 Ⅱ		5	Ta 290.0750 ≥10
				Mo 290.0795 5～7
	290.942 Ⅱ		2	Mo 290.9116 0.7
				Os 290.9061 0.5
	291.959		1	Hf 291.9594 2
				Os 291.9794 7
				Th 291.9842 ≥10

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%	元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ho	292.829	Ⅰ		3	Th 292.8256 5	Ho					Dy 318.7676 7~10
					Mo 292.8493 ≥10						Er 318.7676 3
	294.205	Ⅰ		3	Ti 294.1955 0.7						V 318.7708 0.05
					Er 294.2211 5		319.097			1	V 319.0678 0.03
	295.311	Ⅰ		0.7	Fe 295.3486 50						Ti 319.0874 0.002
					Ta 295.299 5~7						Sc 319.1005 0.5
					Pr 295.3537 5						Nb 319.1096 0.5
	297.963	Ⅰ		0.5	Hf 297.9280 7~10		319.607			2	Mo 319.5956 3
					Fe 297.9352 100						Fe 319.6076 150
					Cr 297.9741 0.1		319.783	Ⅰ		2	V 319.8011 5
	299.027	Ⅰ		0.7							Tb 319.8012 0.5
	301.461	Ⅰ		3	Cr 301.4760 0.03						Lu 319.812 0.5
					V 301.4823 0.07		320.177	Ⅰ		0.7	
	302.314			2	Ti 302.2820 7		321.537			3	Mo 321.5189 5
					Mo 302.3300 2~3						Dy 321.5189 1
	303.869	Ⅰ		1							W 321.526 5~7
	304.938	Ⅰ		2	Dy 304.9133 10						Nb 321.5595 0.1
					Mo 304.929 5		321.667			2	Cr 321.656 1
					Th 304.9615 5						Dy 321.663 0.5
	305.073			2	Tm 305.073 0.5						Th 321.6625 0.7
					V 305.0730 7						Y 321.6682 0.05
					Hf 305.0758 5~7						Ta 321.6923 5
					Ni 305.0829 0.1		322.142	Ⅰ		1~2	Th 322.1293 10
	305.488			2	Zr 305.4835 1						Ta 322.1315 10
	306.419			1	Tb 306.409 5		323.057			5	Er 323.0585 0.01
					Mo 306.4279 5						Mn 323.0712 7
					Nb 306.4533 0.3		323.336	Ⅰ		2	Mo 323.3140 2
					W 306.497 ≥10		323.562			1	Tm 323.545 0.1
	307.430	Ⅰ		1	Mo 307.4374 5						Mo 323.5385 7
	308.436	Ⅰ		0.5			325.739	Ⅰ		0.5	Th 325.7162 10
	308.654	Ⅰ		1	V 308.6503 10						Fe 325.7594 100
	310.268	Ⅰ		2	Th 310.2666 7		325.880			1	In 325.856 0.02
	310.833	Ⅰ		2	Th 310.8298 1						Fe 325.8048 200
	310.993	Ⅰ		7	Th 311.022 7~10						Fe 325.8773 150
					Dy 310.9768 1~2		325.917			3	Fe 325.9048 200
	311.851	Ⅰ		0.5	Os 311.8328 10		327.815	Ⅰ		0.5	Ti 327.8290 0.07
					V 311.8383 0.02		327.926	Ⅰ		1	Ti 327.8922 0.05
					Cr 311.8652 0.05						Ho 327.926 1
					Lu 311.843 7~10						Zr 327.9265 0.05
	313.038			0.7~1	Eu 313.074 10						Er 327.932 0.3
					V 313.0267 0.05						Mo 327.944 10
					Ce 313.0334 1		328.117			0.5	Fe 328.1300 100
					Be 313.0416 0.0001						Tb 328.140 0.3
					W 313.0456 7~10		328.307			3	Dy 328.279 1
					Ir 313.0578 0.5						Zr 328.2834 1
					Ta 313.0578 7						Fe 328.2892 80
	313.440	Ⅰ		1	Ni 313.4108 0.5						Mo 328.2909 10
					Fe 313.4111 125						Th 328.2967 10
	314.435	Ⅰ		0.7			328.846	Ⅰ		2	Zr 328.8803 10
	316.662	Ⅰ		0.5	Ta 316.6377 10		329.096	Ⅰ		2	Nd 329.0643 7
					Fe 316.6438 100						Mo 329.0821 2
	317.171	Ⅰ		0.5							Fe 329.0989 80
	317.379	Ⅰ		0.3	Tm 317.358 1						Tm 329.100 0.1
					Os 317.3926 3						Dy 329.1119 7
	317.486	Ⅰ		0.5~0.7	Sm 317.509 0.03		329.706			7	Mn 329.6882 10
	317.696	Ⅰ		1	Hf 317.6856						Nd 329.1048 7
	318.152	Ⅰ		0.5	Fe 318.1520 70		330.516	Ⅱ		3	Zr 330.5152 5
	318.385	Ⅰ		0.7	V 318.3982 0.07		331.987	Ⅱ		0.7	Tb 331.918 3
					Nb 318.4223 7						Nb 331.9584 3
	318.7743	Ⅰ		1	Mo 318.7592 2~3						Dy 331.9887 5

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ho	332.902			0.5	Sm 332.8667 7
					Mo 332.9215 0.3
	333.101			3	Y 333.0880 5
					Mo 333.090 10
					Sc 333.107 0.1
	333.720	Ⅱ		0.7	
	333.876			0.7	Rh 333.8545 3
					Tb 333.900 3
	334.046			7	Ti 334.0344 0.02
					Mo 334.0508 210
					Zr 334.0555 3
					Fe 334.0566 100
	334.356	Ⅱ		0.7	Th 334.3614 10
	334.446	Ⅱ		3	La 334.4560 0.1
	335.046	Ⅱ		1	Dy 335.066 5
	335.208	Ⅱ		2	Sc 335.2048 3
					Hf 335.2055 1
					Ti 335.2071 7
	335.790	Ⅱ		0.7	
	337.086	Ⅱ		2	Os 337.0588 7
					Nb 337.0611 5
					Fe 337.0786 200
	337.416	Ⅱ		1	Nb 337.4090 2
					Er 337.4170 0.2
					Ti 337.4352 7
					Tb 337.441 5
	338.955			2	Nd 338.9325 0.2
					Er 338.9599 1
					Hf 338.9833 1
	339.075	Ⅱ		1	Tb 339.060 3
					V 339.0765 7
					Ni 339.105 1~2
	339.898	Ⅱ		0.03	
	340.057			1	Tb 340.053 2~3
	340.159			1	Fe 340.1521 90
					Er 340.1830 2
	340.217			3	Fe 340.2262 150
					Cr 340.2399 5
					Tb 340.2422 1
					Ti 340.2422 3~5
	341.025	Ⅱ		0.5	Hf 341.0171 0.5
					Zr 341.0248 1
					Tb 341.040 2
					Mo 341.062 3
	341.286			10	Co 341.2633 0.05
	341.426			1	Ta 341.414 3~5
					Mo 341.4422 7
					Ni 341.4765 0.1
	341.492			0.5	Ta 341.4220 5
					Ni 341.4765 0.1
					Dy 341.4830 7
	341.646			0.07~0.1	Tb 341.624 3~5
					Er 341.645 1
	342.535	Ⅱ		0.3	Dy 342.506 3
					Tm 342.508 0.07
					Nb 342.5424 0.5
	342.676			3	Nb 342.6571 0.5
	342.813	Ⅱ		0.3~0.5	Fe 342.8197 50
					Ru 342.8309 3
					Hf 342.8366 3
Ho					Er 342.8394 1
	342.919	Ⅱ		0.5	
	343.209	Ⅱ		2	Mo 343.2232 10
	345.313			0.2	La 345.3168 0.7~1
	345.600	Ⅱ		0.01	
	346.196	Ⅱ		0.5	Rh 346.2040 1
					Tm 346.220 0.01
	346.940			3	Ni 346.9486 7
					V 346.9525 1
	347.225			3	Cr 347.207 5
	347.425	Ⅱ		0.07~0.1	Co 347.4022 0.07
					Mn 347.4133 0.2
	347.805			0.7	V 347.7516 1
	348.473			0.07~0.1	Nb 348.4627 2
	348.959	Ⅱ		1~2	Co 348.9379 0.05
	349.477	Ⅱ		0.2	
	349.908			0.7	Rh 349.8732 10
					Sc 349.8912 2~3
					Ru 349.8942 0.1
					Er 349.9104 0.01
	350.835			2	Mo 350.8115 7
					Er 350.8395 1
	350.935	Ⅱ		3~5	Tb 350.917 0.01
					Ru 350.9201 0.05
					Zr 350.9323 ≥10
	351.558	Ⅱ		0.2	Nb 351.5422 2
	351.965			0.5	Ni 351.9766 5
	354.597			1	V 354.519 0.1
	355.678	Ⅱ		0.5	Zr 355.6597 0.1
					V 355.6801 0.05
					Fe 355.6883 150
	357.478	Ⅱ		0.7	Co 357.4964 0.03
	359.877	Ⅱ		1	Ti 359.8716 2
	361.333	Ⅱ		3	Zr 361.3100 3
	362.670	Ⅱ		2	Rh 362.6590 3
	362.718			1	Mo 362.735 5
	363.832	Ⅱ		2	Fe 363.8298 80
	367.477	Ⅱ		1	Zr 367.4718 1
	368.516	Ⅱ		0.5	Ti 368.5195 0.0005
In	230.6879	Ⅰ	5.37	5	
	271.0265	Ⅰ	4.84	1	
	275.3878	Ⅰ	4.50	2	Pt 275.386 7
	288.995	Ⅱ	12.10	3	
	293.2624	Ⅰ	4.49	1	V 293.2323 3
					Th 293.252 1
					Nb 293.2662 10
					Ta 293.2695 ≥10
					Cr 293.2705 5
	294.1050	Ⅱ		2	Mo 294.098 0.01
	303.936	Ⅰ	4.08	0.01	Mo 303.9058 7
					Nb 303.9815 1
					C 303.906 0.05
	325.6090	Ⅰ	4.08	0.005	Fe 325.5890 100
					Mn 325.6137 5
					Mo 325.621 7
					Dy 325.625 1
					Th 325.627 7
	325.8564	Ⅰ	4.08	0.02	Ho 325.847 1
					Fe 325.8773 150

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ir	224.268	II		7	
	236.804	II		≥10	Pd 236.796 1
	239.8746			≥10	
	243.1938	I	5.60	7	Co 243.2214 1
					Fe 243.2267 70
					B 243.229 ≥10
	263.9712	I	4.70	3~5	Fe 263.9553 100
					Mn 263.9835 3
	267.6828	I		5	Hf 267.663 ≥10
	269.4223	I	4.95	7	Zr 269.4060 ≥10
					Mn 269.4093 7
	269.5930	I		7~10	
	272.4796			7	Mn 272.4449 1
	277.497			7	Tm 277.499 0.01
	282.445	I	4.74	10	
	283.324	II		5	
	284.973	I	4.35	10	
	293.4638	I	5.10	5	
	296.7004			5	Fe 296.6900 600
	304.2646	II		7	Pt 304.264 0.5
	306.8890	I		3	
	313.3321	I	4.74	5	
	318.0174	I		5	Th 318.0199 1
					Fe 318.0226 300
					Nb 318.0290 0.03
	322.0780	I	4.20	0.7~1	Hf 322.0606 1~2
					Er 322.0730 0.07
	332.6403			5	Dy 332.642 3
					W 332.6130 5
					Os 332.6786 2~3
					Ti 332.677 0.1
					Zr 332.6414 5
	357.3724	I	4.35	0.1	Dy 357.3838 1
					Mo 357.3882 7
	360.583			10	
	365.319			7	
K	344.6722	I	3.60	>10	Ta 344.6910 3
	344.7701	I	3.60	>10	
La	229.777	II	5.59	2	
	237.938	II	5.21	3	
	261.0335	II	5.66	1	Mn 261.0200 0.5
	265.171			5~7	Fe 265.1706 60
					Ge 265.1575 1
	269.5458	II		7~10	
	280.839	II	5.66	1	
	288.5141	I	6.94	0.7~1	Th 288.5045 2
					Mn 288.5125 ≥10
	289.3071	I	7.04	2	
	295.0492	I	7.73	2~3	Fe 295.0243 300
					Er 295.007 5~7
					V 295.0348 1
					Hf 295.0679 5~7
	310.4589	II	4.00	1	
	314.2763	II	4.12	3	V 314.2475 0.1
					Mo 314.2750 7
					Th 314.2839 5
					Fe 314.2883 70
					Ta 314.2955 7~10

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
La	317.1668	II	5.59	0.1	
	319.302	II	4.12	5	
	324.513	II	4.00	0.2	Tb 324.517 5~7
	324.935	II	3.99	0.5	Er 324.9344 1
	326.567	II	4.12	0.1	Fe 326.5619 300
	330.311	II	3.99	0.1	Zn 330.2941 0.5
					Nb 330.3320 5
	333.7488	II	4.12	0.2	Cu 333.7844 5~7
					Er 333.725 3
	334.456	II	3.94	0.07~0.1	Ho 334.446 3
	337.633	II	4.00	0.5~0.7	
	338.091	II	3.99	0.05~0.07	Ni 338.071 0.5
					Nb 338.094 1
					Er 338.108 0.7
	345.218	II	3.77	5	
	345.3168	II	4.00	1	Ho 345.313 0.2
					Co 345.3505 0.003
	350.9989	II		5~7	Ni 351.0338 0.7
	351.2917	II	3.77	7	Co 351.2641 0.1
					Dy 351.2563 2
	351.714	II	5.21	0.1	
	360.923	II		7	
	361.2334	II	3.77	3	
	362.8822	II	3.54	0.7	
	363.7148	II	4.12	3	Nd 363.6990 2
	364.1656	II		5	Tb 364.1099 7
					Nd 364.1502 1
	364.5414	II	3.40	0.1~0.2	Tb 364.538 3
					Sc 364.5311 0.01
					Dy 364.5416 0.01
	365.0174	II	3.39	0.7	Mo 365.0046 3
					Mg 365.0146 1
					Fe 365.0280 50
	366.2073	II	3.51	1	Ti 366.2237 0.05
					Cr 366.2161 0.7
	370.5818	II	4.12	0.1	
Li	323.261	I	3.38	≥10	Ti 323.2280 0.07
					V 323.2953 5
Lu	239.218	II	7.31	2~3	
	248.172	II	9.00	5	
	257.123	II		3~5	Sn 257.1592 0.5
					Hf 257.1670 1
					Zr 257.1391 0.7
	257.879	II		0.7~1	
	260.339			0.1	
	261.340	II	6.20	0.7	
	261.542	II	4.74	0.005	
	261.926	II	6.19	1	Fe 261.9076 150
	265.780	II	6.20	0.3	Hf 265.750 7
					Hf 265.7837 7
	270.171	II	6.35	0.03~0.05	Mo 270.1873 1
					Mo 270.1700 0.3
	275.417	II	6.04	0.05	Nb 275.4522 10
					Ge 275.4592 0.5
	277.258	II	5.54	0.5	
	279.664	II	6.58	0.5	Ta 279.6339 10
					Ta 279.6565 10
					Os 279.6727 5

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Lu	283.435	Ⅱ		5	Mo 283.4394 7
					Nb 283.4116 5
	283.484	Ⅱ	6.04	0.5	
	284.751	Ⅱ	5.81	0.1	V 284.7572 2
					Hg 284.767 7
	289.484	Ⅱ	6.04	0.007	Fe 289.4505 150
					Fe 289.4778 80
					Ho 289.499 0.7
	290.030	Ⅰ	5.81	0.01	Ta 290.0263 10
					Mn 290.055 2~3
					Mo 290.0795 5
	291.139	Ⅱ	6.02	0.005	Er 291.1417 7
					Nb 291.1745 0.5
	295.169	Ⅱ	6.35	0.5	Ta 295.1918 10
	295.578	Ⅰ		7	
	296.332	Ⅱ	5.64	0.01	Ta 296.3322 7~10
	296.982	Ⅱ	5.63	0.07~0.1	Fe 296.9477 60
	298.927	Ⅰ	4.15	7	Bi 298.9029 1
					Os 298.9127 0.5
					Cr 298.9194 0.1
					Ta 298.9497 ≥10
	305.672	Ⅱ	5.81	0.02	Ce 305.6334 7~10
					Ta 305.6615 5
					Ti 305.6740 3
					Tb 305.6740 3
	305.790	Ⅱ	4.83	0.01	Mo 305.788 10
	307.760	Ⅱ	5.57	0.005	Mo 307.7661 1
					Os 307.7720 5
					Cr 307.7880 5
	308.147	Ⅰ	4.27	5	Mo 308.165 3
	311.843	Ⅰ		7~10	Ho 311.851 0.5
					Os 311.8328 10
					V 311.8383 0.02
					Cr 311.8652 0.05
					Fe 311.8434 80
	317.136	Ⅰ		5	Fe 317.1353 0.3
	319.180	Ⅱ	7.90	1~2	Nb 319.1427 0.3
					Fe 319.1659 150
	319.812	Ⅱ	5.63	0.5	Tb 319.8013 0.5
	325.431	Ⅱ	5.57	0.01	Nb 325.4076 0.5
					Ti 325.4250 0.01
					Fe 325.4363 150
					Co 325.4206 2
	327.897	Ⅰ	3.78	5	Tb 327.804
					Fe 327.8734 60
					Mo 327.8881 0.7~1
					Ti 327.8922 0.05
					Ho 327.926 1
	328.174	Ⅰ	4.02	0.7~1	V 328.1754 7
	331.211	Ⅰ	3.74	0.5	Sc 331.1708 0.3
					Cr 331.1925 1
	335.956	Ⅰ	3.94	0.3~0.5	Dy 335.9478 5
					Sc 335.9679 0.1
					Os 335.9749 7~10
	337.650	Ⅰ	3.67	1	
	339.705	Ⅱ	5.11	0.005	Bi 339.7213 5
	347.249	Ⅱ	5.11	0.007	Hf 347.2405 5~7
					Ni 347.2545 2
	350.739	Ⅱ	3.53	0.01	Rh 350.7316 1
	350.842	Ⅰ	3.78	3	Fe 350.8485 20
Lu	355.443	Ⅱ	5.63	0.003	
	356.784	Ⅰ	3.47	1	Sc 356.7707 0.007
	362.399	Ⅱ	5.57	1	Hf 362.400 7
Mg	277.6690	Ⅰ	7.18	0.5	
	277.8288	Ⅰ	7.18	1	Fe 277.8221 80
	277.9834	Ⅰ	7.18	0.02	Mo 278.0036 7
	278.1417	Ⅰ	7.18	0.7	V 278.1454 10
	278.2974	Ⅰ	7.18	0.7	
	279.0787	Ⅱ	8.86	0.01	
	279.553	Ⅱ	4.43	0.01	
	279.806	Ⅱ	8.86	0.007	
	280.2695	Ⅱ	4.42	0.002	Ti 280.2500 7
					V 280.2523 5
					Mn 280.2800 1
					Co 280.2844 7
					Eu 280.286 1
	280.978			5~7	
	285.2129	Ⅰ	4.34	0.007	Hf 285.2012 3
					Fe 285.213 80
					Ta 285.2355 10
					Zr 285.2967 ≥10
	291.552			5	
	292.875	Ⅱ	8.65	3	
	293.6895	Ⅰ	6.92	0.3	Mo 293.681 2
					Fe 293.6905 500
Mn	245.2526	Ⅱ	9.86	3	
	253.8047			10	
	254.2495			7~10	
	255.6573	Ⅱ		3~5	
	255.7537	Ⅱ		7	Fe 255.7502 50
					Ta 255.7709 7
	255.8588	Ⅱ		2	
	257.6104	Ⅱ	4.81	0.007~0.01	
	257.891			10	
	258.2965	Ⅱ	10.19	7~10	
	258.4533			10	
	258.8957			5	
	258.9708	Ⅱ	8.85	3~5	
	259.0143			5	
	259.3729	Ⅱ	4.77	0.01	Ta 259.3660 3
					Fe 259.3726 70
					Nb 259.3764 10
	259.5761	Ⅰ	7.10	7~10	Ta 259.5586 10
	260.2720	Ⅱ	10.50	5	Mo 260.2798 5
	260.3719	Ⅱ		10	Ta 260.3573 1~2
	260.4356			≥10	Nb 260.4754 ≥10
	260.5688	Ⅱ	4.75	0.01~0.02	Co 260.5677 3
	261.0200	Ⅱ	8.16	0.5	La 261.0335 1
	261.8143	Ⅱ	8.15	0.5	Fe 261.8017 50
	263.2352	Ⅱ	8.13	1	Ta 263.227 10
					Co 263.2239 1~2
					Fe 263.2236 60
					Nb 263.2516 5
	263.8171	Ⅱ	8.12	2	Nb 263.8130 2
	263.9835	Ⅱ	8.75	5	Fe 263.9553 100
					Ir 263.9712 3~5
					Zr 264.0151 7
	265.0994	Ⅱ	10.19	1	Nb 265.1112 3

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%	元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Mn				Be 265.0702 0.005	Mn	281.2845 I	6.59	3	Mo 281.2585 10
				Hf 265.1165 5		281.5018 II	8.75	3	
				Ta 265.1221 5		287.0083 II		2～3	V 286.9961 10
				Ge 265.1178 0.1		287.2914 I	6.47	5	
	265.2485 II	8.75	3	Al 265.2489 0.3		287.9488 II		2	
				Sb 265.2606 5		288.5125		≥10	Th 288.5045 2
	265.5792		5	V 265.5676 10					La 288.5141 0.7～1
				Ni 265.5907 10		288.6678 II		1	Tm 288.6159 ≥10
	266.7005 II	8.72	3～5	Yb 266.697 3～5		288.958 II		0.1	
	267.2586 II	8.34	2	Cr 267.2831 0.5		289.1321		5	Th 289.1254 10
				Mo 267.2843 0.3					Mo 289.1275 5
	267.3368 II	8.71	5	V 267.323 ≥10					Yb 289.138 0.3
				Mo 267.3273 1					Tb 289.141 5
				Eu 267.3409 10					V 289.1647 0.07
				Nb 267.3567 0.5		289.2392 II		1～2	V 289.2441 0.05
	267.4744		7	Rh 267.4441 7					Fe 289.2483 40
	267.7246		≥10	Cr 267.7159 0.3		289.7427		7～10	Fe 289.7262 200
	267.7846		7	Nb 267.7660 7					Ho 289.736 7
				V 267.7802 1					Mo 289.7421 5
	268.1235 II	10.44	7			289.8693 II		2～3	Mo 289.8481 5
	268.5940 I	7.76	7	Mo 268.5790 10					Cr 289.8536 0.1
	II	8.39							Hf 289.8709 3
	268.8246 II		2						As 289.871 7
	269.1974		7	Nb 269.1773 0.1		290.0547 I	7.41	2～3	Lu 290.030 0.01
	269.2447 I	7.74	5	Fe 269.2597 300					Ta 290.0353 10
				Mo 269.2013 7					Nb 290.0675 10
	269.4093		7	Ir 269.4233 3～5					Ta 290.0730 10
				Zr 269.406 ≥10					Mo 290.0795 5
	270.1700 II	8.00	1	Mo 270.1417 1		290.722 I	7.40	3	
				W 270.1477 2		291.311		0.5	
				Lu 270.171 0.3		293.025 I	6.35	0.2	
	270.5735 II	7.99	1	W 270.5572 10		293.3063 II	5.41	0.1	
				Rh 270.5629 2		293.9304 II	5.40	0.01	Ta 293.928 ≥10
				Co 270.5848 7					Ho 293.929 5
	270.7530 II	7.99	7	Co 270.7505 10		294.3132		5	Th 294.2862 3
				Nb 270.7833 7～10					Ti 294.313 3
				V 270.7863 7					Co 294.315 ≥10
	270.8451 II	7.99	1			294.9205 II	5.37	0.005～0.01	Th 294.9096 5～7
	270.9610		7	W 270.9577 ≥10					V 294.9168 0.7
				Ge 270.9626 0.5		295.1160		3～5	Nb 295.0878 0.03
	271.0333 II		1～2	Mo 271.0194 7					Tb 295.1264 1
	271.1584 II	7.99	1			296.361 I	6.33	1	Zr 303.0918 ≥10
	271.9300		2						Sc 303.0769 0.1
	272.4449 II	8.26	0.7～1	W 272.4627 3					Hf 303.116 0.7～1
	272.8608 II	13.02	3～5	V 272.8640 5					Fe 303.1215 150
				Mo 272.8704 7		303.5365		3～5	Th 303.5113 7
	279.4817 I	4.44	0.7	Fe 279.5007 35					Mo 303.4925 7
				Co 279.4816 5					Nb 303.495 2
	279.8271 I	4.43	0.7	Mg 279.806 0.007		303.8503		5	Dy 303.8291 2
	280.1064 I	4.43	0.7	Cr 280.0771 0.1		304.0603 I	7.22	7	Fe 304.0428 400
				Eu 280.0869 1					Cr 304.0846 0.05
				Mo 280.0771 10					Os 304.0900 3
				Sc 280.1312 0.3		304.3356 I	7.22	10	Dy 304.3144 7
				Zn 280.1869 7					Mo 304.3447 7
				C 280.131		304.7035 I	7.21	5	
	280.2800		0.7～1	Mg 280.2695 0.002		304.8864 I	7.21	≥10	Ta 304.8864 10
				Co 280.2844 7					V 304.8892 5
				V 280.2523 5		305.4362 I	6.19	10	Ni 305.4316 1
				Ti 280.2500 7					Er 305.442 1
				Eu 280.286 1		321.2884 I	5.97	1～2	V 321.2434 3～5

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Mn				Dy 321.2648 7
	322.8090 I	5.95	0.7~1	Mo 322.8215
				Fe 322.8254 80
	323.0719 I	5.97	7	Ho 323.057 5
				Er 323.0585 0.01
				Au 323.0636
				Th 323.0869 10
				Fe 323.0967 200
	323.6778 I	5.97	1~2	Zr 323.6578 10
				Ti 323.6573 0.0007
				Dy 323.663 3~5
				Tm 323.6797 0.3
	324.3780 I	5.98	5	Fe 324.3724 60
				Dy 324.378 5
				Co 324.3840 2
	324.7542		3	Cu 324.7540 0.002
	324.8519 I	5.98	3	Ti 324.860 0.003
				Nb 324.7974 1
	325.6137 I	5.97	5	Fe 325.5890 100
				In 325.6090 0.005
				Mo 325.6210 7
				Dy 325.625 1
				Th 325.6273 7
	325.8413 I	5.98	10	Ho 325.847 1
				In 325.856 0.02
				Tm 325.862 0.5
				Mo 325.8687 5
				Fe 325.8773 150
	343.8974 II	4.78	0.7	
	344.1988 II	5.37	0.5	Dy 344.1453 7~10
				Tm 344.151 0.1
	346.0328 II	5.39	1	Tb 346.038 3
				Re 346.047 0.1
	347.4044 II	5.37	1	Co 347.4022 0.1
				Nb 347.3934 5
				Ho 347.425 0.1
	348.2909 II	5.39	1~2	Nb 348.2951 5
				Tb 348.304 7
	348.8680 II	5.40	2	Nb 348.8832 3
	349.5839 II	5.40	5	Co 349.5687 0.2
				Hf 349.5748 3~5
	349.6807 II		7	Er 349.6860 1
				V 349.7050 3
	353.1848 I	5.79	1	Dy 353.1712 0.003
				Ho 353.174 5
	354.7802 I	5.79	0.7~1	
	357.0100		0.5	Fe 357.0097 300
	357.7880 I	5.57	3	
	360.8494 I	5.59	10	
	361.0299 I	5.61	7~10	Ti 361.0156 3~5
				Cd 361.0510 0.1
				Fe 361.0162 90
				Ni 361.0462 1
Mo	260.2798 II	7.80	5	W 260.2512 10
				Mn 260.2720 5
	263.6670 II	6.19	2	
	263.8758 II	6.23	0.5	Hf 263.8710 0.7~1
				Eu 263.8768 7
	264.115		7	Ti 264.1099 7
Mo				Eu 264.126 7
				Hf 264.1406 0.1
	264.4353 II	7.80	).7	Fe 264.4000 150
				Ti 264.4264 10
				V 264.4355 10
				Ta 264.4598 5
	264.6488 II	6.22	1	Nb 264.6258 1
				Ta 264.677 10
	265.3349 II	6.26	0.7	Ta 265.3274 5
				W 265.3567 10
				Cr 265.3586 0.3
				Co 265.3703 3
	266.0579 II	6.15	0.5~0.7	
	267.1834 II	6.55	1	Cr 267.1809 0.5
				Nb 267.1931 1~2
				V 267.2004 1
	267.2843 II	8.23	0.5	Mn 267.2586 2
				W 267.2669 ≥10
				Cr 267.2831 0.5
	267.3273 II	7.42	1	Nb 267.3567 0.5
				Mn 267.3368 5
				Cr 267.3656 1~2
				V 267.323 ≥10
	268.3231 II	7.84	0.5	Hf 268.3353 2
				Rh 268.3563 10
	268.4143 II	6.28	0.3	Rh 268.4214 10
	268.7993 II	6.14	0.5	V 268.7956 0.1
				Cr 268.804 3
	270.1417 II	6.08	1	Mn 270.1700 0.7
				Lu 270.171 0.3
	271.3093		5	V 271.3046 10
	271.7352 II	6.48	1	Nb 271.7329 ≥10
	272.9683 II	6.08	3	Eu 272.939 10
	273.0197 II	7.82	5	
	273.7880 II		5	
	275.8506		7~10	Nb 275.878 5
				Zr 275.8813 7
	276.3620 II	6.36	5	
	276.9762 II	7.83	3	Cr 276.9915 5
				Sb 276.9939 1
	277.4392 II	6.41	5~7	
	277.5400 II	6.13	0.2	Co 277.5181 7~10
				Hf 277.75266 ≥10
				Ni 277.5327 10
	278.4992 II	6.55	1	Ta 278.4967 7
				Th 278.4978 ≥10
	280.7755 II	8.80	1	
	281.6154 II	6.06	0.01~0.02	
	281.7500		3~5	Ta 281.7101 5~7
	283.4394 II		5	Lu 283.435 5
	283.9164		1	Ir 283.916 10
	284.2151 II		2~3	Ti 284.1938 0.5
				Ni 284.2420 ≥10
	284.2369		5	Nb 284.2648 3
	284.5647		7	Ho 284.560 0.095
				Nb 284.5802 0.7
	284.8232 II	5.95	0.05	Zr 284.8192 ≥10
				Os 284.8241 ≥10
	285.0674		7	Ta 288.5491 5
	285.3229 II	7.70	0.1	Cr 285.3218 0.01

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%		
Mo	286.3811	Ⅱ	7.64	0.7	Fe	286.3864	100
					Ni	286.3700	5~7
	286.6693	Ⅱ		1	Fe	286.6629	80
					Cr	286.6742	0.03
					Sc	286.671	2~3
	286.8316	Ⅱ		7	Nb	286.8525	0.5
					Ho	286.782	3
	287.1508	Ⅱ	5.86	0.1	Co	287.124	3
					Ta	287.1417	10
	287.2884	Ⅰ	8.44	1			
	287.4847	Ⅰ	8.46	3	Os	287.4955	≥10
	287.9047	Ⅰ	8.07	1	Er	287.8913	7
					W	287.9047	5
	288.5736			7	Dy	288.550	10
					Fe	288.5928	70
	288.8153	Ⅱ		1	U	288.826	1
					V	288.8246	1
	289.099	Ⅱ	5.78	0.1	Ta	289.1038	10
					Ti	289.1066	7
	289.2812			2	V	289.2659	0.05
	289.4451	Ⅱ	5.95	0.1	Fe	289.4505	50
	289.7421			5	Fe	289.7262	200
					Ho	289.736	7
					Mn	289.7427	7
	290.0795	Ⅱ		5	Ta	290.001	≥10
					Lu	290.030	0.01
					Ta	290.0363	10
					Mn	290.055	2~3
					Nb	290.0675	10
					Ho	290.083	5
	290.306	Ⅰ	7.55	0.5			
	290.5266	Ⅰ		7~10	Zr	290.5226	≥10
					Os	290.5970	≥10
	290.7116	Ⅱ		7			
	290.9116	Ⅱ	5.72	0.7	Os	290.9061	0.5
					Ho	290.942	2
	291.1915	Ⅱ	5.86	0.2	Nb	291.1745	0.5
	291.3808	Ⅱ	8.45	2~3	Os	291.3844	≥10
	291.8828	Ⅱ		5	Ta	291.896	7
					Zr	291.927	5
	292.3391	Ⅰ	5.78	0.2			
	292.4318	Ⅰ		2	V	292.4025	0.01~0.02
	292.5405			2	Ta	292.5265	10
	292.622			3	Fe	292.6587	400
	292.7539	Ⅱ		2	Nb	292.7810	0.05
	293.0064	Ⅱ		7	Pt	292.9794	5
	293.0503	Ⅱ	5.72	0.3	Co	293.043	10
					V	293.0806	0.07
					Cr	293.0853	5
	293.4299	Ⅱ	7.82	0.5	V	293.4401	2
					Cr	293.4493	5
					Er	293.4517	7
					Dy	293.4529	3
	294.1222	Ⅰ		2	V	294.1369	0.07
	294.4821	Ⅱ	8.56	1	Fe	294.4398	600
					Ho	294.450	7~10
					V	294.4571	0.5
	294.6009	Ⅰ		2	Nb	294.5882	1
					Y	294.595	0.5
Mo	294.6690	Ⅱ		1	Er	294.6615	5
					Nb	294.6898	3
	294.7285	Ⅱ		2	Fe	294.7658	100
					V	294.6981	0.7
	295.6902	Ⅱ		3	Ta	295.684	7
	296.1320			5	Cu	296.1165	0.5
					Fe	296.1281	40
	296.3794	Ⅱ		5	Ta	296.3910	10
	297.1906	Ⅱ		5	Cr	297.1906	0.05
	297.2614	Ⅱ	6.27	1	Nb	297.2572	0.2
	297.5404	Ⅱ		2	Ta	297.5558	10
					V	297.5652	5
					Er	297.5679	2
					Dy	297.582	7~10
	297.7270			10	Pr	297.6975	5
	297.7765			7	Hf	297.7595	7
					Nb	297.7681	1
	297.8609			5	Th	297.864	0.7
					Ta	297.8754	10
	298.6162	Ⅱ	7.87	3~5			
	298.6912			7	Ta	298.6807	7
	298.7920	Ⅰ		3~5	Si	298.7684	≥10
					Zr	298.7799	10
					V	298.8021	1
					Th	298.8234	5
	299.2838	Ⅱ		2	V	299.2988	7
	299.3515	Ⅱ		5	Bi	299.3342	5
					W	299.3611	0.7
					Th	299.3803	1
	300.0232			5	Hf	300.0096	5
					Fe	300.0452	80
	301.3763	Ⅰ		2~3			
	301.855	Ⅱ	9.04	5	Hf	301.8314	≥10
					Cr	301.8496	0.3
	302.1617			7	Cr	302.1558	0.05
	302.3300	Ⅱ	8.49	2~3	Ti	302.2820	7~10
					Ho	302.314	2
	302.7771	Ⅱ		7	Pd	302.7910	2~3
					Zr	302.8040	5
					V	302.8043	5
	303.333			2~3			
	304.101			10	Cr	304.0846	0.05
					Os	304.0900	5
	304.929			5	Th	304.9095	5
					Ho	304.938	2
	305.2320	Ⅱ	7.37	7	Tb	305.218	5~7
					Dy	305.2324	7
					Ta	305.2534	7
	305.3289			3	Fe	305.3070	80
					Y	305.327	5
					V	305.3387	0.5
	306.0777	Ⅱ		7	V	306.0460	2
					Dy	306.0653	1~2
	306.4279	Ⅰ	6.12	5	Tb	306.409	5
					Ho	306.419	1
					Nb	306.4533	0.3
					Ni	306.4623	5~7
	306.7642	Ⅱ	7.80	5~7	Bi	306.7716	0.01
					Th	306.7734	2
	307.4374	Ⅰ	6.13	5	Ho	307.430	1

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Mo	307.7661 Ⅱ	8.41	1	Lu 307.766 0.005
				Os 307.7720 5
				Cr 307.7831 5
	308.2220		5~7	Al 308.2155 0.003
				Ta 308.236 10
				V 308.2523 5
				Co 308.2844 7
	308.5615 Ⅰ	6.10	7	Ta 308.5535 ≥10
	308.7621 Ⅱ	7.38	0.2	Ta 308.776 5~7
	309.2074 Ⅱ	5.95	2	Hf 309.2245 7
	309.4664 Ⅰ	6.08	7	Nb 309.5183 0.007
	309.7201		10	Nb 309.7122 2
				Ti 309.7186 0.5
				Ni 309.7118 1
	309.7689		10	Th 309.776 1
	309.8465		10	Tm 309.859 7
	311.0644		3~5	Ti 311.0673 0.7
				V 311.0706 0.01
	311.2124 Ⅰ		7	Er 311.203 0.7
				Ti 311.205 3~5
				Th 311.235 1
	311.7545		2	
	312.1999		0.5	Er 312.189 7~10
				Tb 312.194 7
				Dy 312.203 10
	312.1999 Ⅱ	7.28	5	
	313.2594 Ⅰ	3.96	0.07	Er 313.251 0.05
				Ta 313.2641 10
				Sc 313.2729 1~2
				V 313.2745 0.03
	313.6412		3~5	V 313.6514 0.1
				Cr 313.6680 0.1
				Co 313.6726 ≥10
	313.8715 Ⅱ		1~2	Er 313.849 3
	313.9871		≥10	Tb 313.9640 3
				Hf 313.9653 5~7
				Th 313.9729 2
	314.1730		3~5	Er 314.180 0.7
	314.2750		7	Dy 314.2302 7
				Fe 314.2453 100
				V 314.2475 0.1
				La 314.2762 3
				Ta 314.2955 7~10
	314.5286		≥10	Co 314.502 ≥10
				Cr 314.5103 7~10
				Tb 314.522 3~5
				Dy 314.5222 3~5
				Hf 314.5319 5
				V 314.5342 3
				Nb 314.540 0.1
	315.1630		3	V 315.1322 3
				Fe 315.1351 150
				Tm 315.189 1
				Dy 315.1893 5
	315.2819 Ⅱ	7.21	0.5	Nb 315.2782 5
	315.5644 Ⅱ	7.52	1	V 315.5408 5
				Ti 315.5610 0.1
				Zr 315.5671 7
				Nb 315.5763 7
	315.8165 Ⅰ	3.93	0.5	Ta 315.7955 10
Mo	317.0347 Ⅰ	3.91	0.05	Ta 317.0289 ≥10
				Dy 317.0289 7
	317.2742 Ⅱ	5.85	3	Pr 317.2314 7
				Tm 317.282 0.1
	317.5049 Ⅱ	7.17	2	Sn 317.5019 0.03
				Ho 317.486 0.5~0.7
	317.633 Ⅱ	8.07	2	
	318.7592 Ⅱ	6.85	2~3	Dy 318.7676 7~10
				V 318.7708 0.05
				Ho 318.7743 1
				Er 318.7785 3
	318.8403		10	V 318.8513 0.05
				Fe 318.8571 100
	319.3973 Ⅰ	3.88	0.3	Hf 319.3526 1
	320.5541		7	Fe 320.5400 200
	320.8834 Ⅰ	3.87	0.5	V 320.8352 3
				Fe 320.8275 80
				Nb 320.8585 5
				Cr 320.8590 7
				Dy 320.881 5~7
	321.4442 Ⅱ	7.45	5	Zr 321.4189 1
				V 321.4750 2
	321.5073 Ⅰ		5~7	V 321.4750 2
				Ti 321.47[illegible] 1
				Dy 321.5189 1
				Zr 321.519 10
				W 321.526 5~7
				Ho 321.537 3
	321.6068 Ⅱ	7.95	2	Fe 321.5940 150
	322.9710 Ⅱ	7.55	2	Nb 322.9563 2
				Tb 323.003 2
	323.7075 Ⅰ		7	Dy 323.7098 0.7
				Tm 323.6799 0.3
	324.0713 Ⅱ	5.95	1	Tm 324.0229 0.7
				Er 324.0484 3
	325.3510 Ⅱ	7.96	2	
	325.6210 Ⅰ		7	Th 325.5273 5
				Fe 325.5890 100
				In 325.6090 0.005
				Dy 325.625 1
				Mn 325.6137 5
	326.5139		7	Fe 326.5048 150
	326.6887		5	Tm 326.663 1
				Er 326.715 0.1
	326.7639		7	Tm 326.741 0.7~1
				Sb 326.7502 0.7~1
				V 326.771 0.02
	327.1666 Ⅱ	6.85	3~5	Ti 327.1652 5
	327.6336		3	V 327.6124 0.01
	327.8881 Ⅱ	7.37	7	Ti 327.8922 0.07
	327.9422		10	Tb 327.904 1
				Ho 327.926 1
				Zr 327.9265 0.07
				Er 327.932 0.3
				Ti 327.9922 0.05
	328.5024 Ⅰ		7	Zr 328.5150 5
				Tb 328.504 0.1
	328.9015 Ⅱ	7.37	5	Dy 328.934 1
				Yb 328.937 0.005
				Ho 328.938 10

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Mo				V 328.9389 3
	329.0823 Ⅱ	6.85	2	V 329.0238 10
				Cu 329.0544 7
				Nd 329.0643 7
				Th 329.0823 0.7
				Ho 329.096 2
	329.2312 Ⅱ	6.91	0.5	Nb 329.2020 7
				Fe 329.2023 125
				Th 329.2518 3
	329.629		7	Nb 329.6012 7
				V 329.6052 ≥10
	331.294 Ⅱ	7.32	7	Dy 331.2729 3
				Hf 331.2865 7
	331.3624 Ⅱ	7.32	3	Sc 331.3539 0.1
				Th 331.3650 0.7
				Er 331.3653 1
	332.0902 Ⅱ	6.85	2	Tb 332.115 0.7
				Sn 332.1184 10
				Th 332.081 5
	332.1196		10	Tb 332.115 5
				Be 332.1343 0.01
				Th 332.1453 5
	332.3949 I		7	Tb 332.389 5
				Nb 332.3894 10
	332.8563		10	Hf 332.8213 5~7
				Nd 332.8270 5
				Fe 332.8867 100
	332.9215 Ⅱ	6.78	2	Tb 332.908 0.5
				Ti 332.9456 0.01
	333.090		10	Sn 333.0594 0.5
				Ta 333.1007 3~5
	334.4746 I	5.09	5	
	334.6403 Ⅱ	6.85	1	Ti 334.6728 0.7
				Nb 334.6750 5
	334.7018 I		3	Ti 334.6728 0.7
				Nb 334.6956 5
	335.812 I	5.11	1	Nb 335.8417 0.5
	336.3783		7	
	336.7969	7.77	2	Dy 336.8116 2
	336.9939-		7	Tb 337.014 0.7
				Nb 337.0158 5
				Os 337.0202 ≥10
	338.0215		2	Ti 338.0280 0.01
				Ni 338.0574 0.5
	338.3981		7	
	338.4616 I	5.13	5	
	339.1851		5	
	340.2812 Ⅱ	7.80	1	Th 340.2701 5
	340.5937 I		3	
	342.2777		5	Dy 342.257 1~2
	343.540 Ⅱ	7.37	5	
	343.7216 I		3	Ni 343.7280 2
				Ta 343.7373 7
	344.6085 Ⅱ		2	Ni 344.6263 0.3
	344.7123 I	5.14	0.7	Ta 344.6910 7
	344.9074 I		7	Co 344.9170 0.05
	345.6387 I		7	Dy 345.6566 0.7
	346.0784 I		7	Pd 346.0774 0.3
	350.4413 I	5.80	5	V 350.4439 2
				Dy 350.4522 2

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Mo	350.8115 I		7	Er 350.8395 1
				Ho 350.835 3~5
	352.4646 Ⅱ	6.48	3	Ni 352.4541 0.02
				Dy 352.461 0.1
				V 352.4715 5
	353.7275 I		5	
	361.4253		3~5	
	362.4464 I		5	
	363.5429 I		1	
	365.9359		5	
	368.1725		1	
	368.8307 Ⅱ	6.48	0.1	
	369.2645 Ⅱ	6.42	0.7	V 369.223 0.3
Na	330.2323 I	3.75	≥10	
	330.2988 I	3.75	≥10	
Nb	241.4211		5	Co 241.4063 0.5
	245.6996		1	
	249.973 Ⅱ	8.24	1~2	
	251.1005 Ⅱ		5~7	Ni 251.0873 3
				Co 251.1016 0.5
				Ho 251.112 7
	255.6936 Ⅱ		7	
	258.0285		5	Co 258.0326 0.05
				Os 258.0026 3
	258.3986 Ⅱ	6.02	0.7~1	Ta 258.4027 3
	259.0944 Ⅱ		3~5	
	260.1291		3	
	263.2516		5	Co 263.2239 1~2
				Fe 263.2236 60
				Mn 263.2352 1
	263.8597		2	Hf 263.8710 0.7
				Mo 263.8758 0.5
	264.2238 Ⅱ		0.7	Mo 264.2408 ≥10
	264.6258 Ⅱ		1	Mo 264.6488 1
				Ti 264.6657 5~7
				Ta 264.677 10
	265.1122 Ⅱ	6.02	3	Mn 265.0994 7
				Hf 265.0165 5
				Ge 265.1178 0.1
				Ta 265.1221 5
	267.1931 Ⅱ	4.74	1~2	Cr 267.1809 0.5
				Mo 267.1834 10
				V 267.2004 1
	267.3567 Ⅱ	6.55	0.5	Mo 267.3273 1
				Mn 267.3368 5
				Cr 267.3656 1~2
	267.5944 Ⅱ	4.60	3	Ti 267.5901 2
				u 267.595 0.05
	268.0057 Ⅱ	5.60	5	Ta 268.006 7
	268.6391 Ⅱ	6.91	1	Zr 268.628 7
	269.1773 Ⅱ	4.62	2	Fe 269.1732 35
	269.7063 Ⅱ	4.75	0.2	
	271.5344 Ⅱ	6.58	3	V 261.5686 5
	271.6624 Ⅱ	4.71	0.7	Fe 271.6218 150
				Eu 271.697 10
	275.4522 Ⅱ	4.55	10	Ge 275.4592 0.5
	275.878 Ⅱ	5.84	5	Ni 275.8019 ≥10
				Mo 275.8506 7~10

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Nb					Zr 275.8813 7
	276.5279			7	
	276.8128	Ⅰ	4.53	0.5	
	277.1654			5	V 277.1404 ≥10
					Th 277.1515 7
					Mo 277.1689 7
					Ta 277.1833 7
	278.0245	Ⅱ	4.97	1	Mo 278.0036 0.5
					As 278.0197 0.5
	279.1740	Ⅱ	5.66	3	Mo 279.1540 7
	279.3048	Ⅱ	4.88	1~2	Er 279.3168 1
	279.7693	Ⅱ	5.84	5	Ta 279.7760 3
					Th 279.7740 5
	281.0812	Ⅰ	5.45	2	Ti 281.0302 1
					Ta 281.0916 10
	281.6677	Ⅰ	6.09	7	
	282.7077	Ⅰ	4.40	2	Tm 282.702 7
	284.1146	Ⅰ	4.74	3	
	284.2648	Ⅱ	4.69	1	
	284.4435			10	Ta 284.4463 3
					Zr 284.4579 5
	284.6285	Ⅱ	4.65	3	Ti 284.6092 2
	286.1093	Ⅱ	4.62	1	Hf 286.1012 1~2
					Cr 286.0934 0.07
					Os 286.0956 7~10
	286.8525	Ⅱ	4.65	0.5	Mo 286.8316 7
					Ti 286.8742 7
	287.5392	Ⅱ	4.69	0.3	Fe 287.5346 70
	287.6947	Ⅱ	4.75	0.2	Fe 287.6802 100
	288.3178	Ⅱ	4.74	0.05	
	288.8833	Ⅱ	4.58	1	Ti 288.863 10
	289.7812	Ⅰ	4.65	0.5	Bi 289.7975 5
	289.9239	Ⅰ	4.71	0.7	Ta 289.9044 10
					Fe 289.9415 100
	290.8243	Ⅰ	4.55	0.5	U 290.8275 1
	290.8979	Ⅰ		3	
	291.0587	Ⅱ	4.63	0.3	Ho 291.035 2
					Er 291.0357 0.05
	291.1745	Ⅱ	4.58	0.5	Mo 291.1915 0.2
					Lu 291.139
	291.7052	Ⅱ	5.58	5	Mo 291.7151 ≥10
					Os 291.7258 0.3
	292.7810	Ⅰ	4.75	0.05	
	293.1469	Ⅰ		3	Ti 293.1261 5
	293.2662	Ⅱ	5.57	10	Th 293.252 1
					V 293.2624 3
					In 293.2624 1
					Ta 293.2695 ≥10
					Cr 293.2705 5
	294.1543	Ⅰ	4.65	0.1	V 294.136 0.02
					Ti 294.1369 0.07
	294.6116	Ⅰ		1	Y 294.595 2
	295.0878	Ⅱ	4.71	0.02~0.03	La 295.0490 2~3
					Hf 295.0679 5
	297.2572	Ⅱ	5.58	0.2	Fe 297.2279 40
					Mo 297.2614 1
	297.4098	Ⅱ	5.53	0.1	Sc 297.4006 0.1
					Th 297.4013 7
					Tm 297.429 10
	297.7681	Ⅱ	5.40	1	Hf [illegible] 7
Nb					Mo 297.7765 7
	297.8943	Ⅱ	6.31	5	Ta 297.8754 10
	298.0717		5.68	2	Fe 298.0539 70
					Sc 298.0752 0.1
	300.5767		6.27	5	Hf 300.5557 7
					Yb 300.5765 0.5
	302.2739	Ⅱ	6.26	2	V 302.2566 3
					Ti 302.2820 7
	302.4738	Ⅱ	5.45	0.5	Cr 302.4350 0.5
					Bi 302.4635 1
					Th 302.4669 ≥10
					Hf 302.4603 7
	302.8443	Ⅱ	4.53	0.2	Zr 302.8040 5
					Cr 302.8125 0.3
					Er 302.8278 7
	303.2768		5.41	0.2	Cr 303.2927 5
	303.495	Ⅱ	6.09	2	Mn 303.5365 3~5
					Th 303.5113 7
	303.9815	Ⅱ	5.49	1	In 303.956 0.01
	305.3637	Ⅰ		5	Cr 305.3880 0.2
					V 303.389 1
	305.5522	Ⅱ	6.05	1	Fe 305.5263 150
					Hf 305.544 7
					Ce 305.559 5
	306.3130			10	Ce 306.3010 1
					Th 306.3026 3
	306.4533	Ⅱ	5.32	0.5	Tb 306.409 5
					Ho 306.419 1
					Mo 306.4279 5
					Ni 306.4623 2
					Pt 306.4712 0.2
					Hf 306.4758 5
	306.5264		5.39	0.3	Sc 306.5106 0.02
					Pd 306.5306 1~2
					Fe 306.5315 60
	306.9680	Ⅰ		1	
	307.1178			3	Ti 307.1242 0.7
					Ba 307.1591 10
	307.218			2	
	307.427			3	
	308.035	Ⅰ	5.37	1	Nd 308.0099 1
					Th 308.0221 5
	309.4183	Ⅱ	4.52	0.007	V 309.4199 0.05
	312.589			7	Zn 312.592 0.01
	312.7526	Ⅱ	6.12	0.2	Th 312.715 10
					Ta 312.7765 3
	313.0786	Ⅱ	4.40	0.01	Ta 313.0578 7~10
					Ti 313.0800 0.1
	314.540	Ⅱ	4.97	0.1	Cr 314.5103 7~10
					Tb 314.522 3~5
					Dy 314.5222 3~5
					Hf 314.5319 5
					V 314.5286 ≥10
	315.2159	Ⅱ	6.54	1	Ti 315.2251 0.1
	316.3402	Ⅱ	4.30	0.01~0.02	
	317.320	Ⅱ	5.74	2	
	317.5850	Ⅱ	4.83	0.07	Th 317.5730 7
	318.0290	Ⅱ	4.88	0.07	Th 318.0199 1
					Ir 318.0174 5
					[illegible]

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Nb	318.4223 Ⅱ	5.87	1	V 318.3982 0.07
	318.9282 Ⅱ	6.05	0.7	Dy 318.9064 0.03
				V 318.9078 0.03
				W 318.9236 7
				Os 318.9459 7
	319.1096 Ⅱ	4.40	0.5	Ti 319.0874 0.002
				Ho 319.097 1
				Sc 319.1096 0.5
	319.1427 Ⅱ	6.03	0.3	Fe 319.1659 150
				Lu 319.179 1～2
	319.4977 Ⅱ	4.21	0.03	Mo 319.5235 5
	320.3353 Ⅱ	6.01	0.5	Y 320.3323 0.07
	320.6343 Ⅱ	4.80	0.1	Ta 320.6386 ≥10
				Dy 320.640 2
				W 320.6405 10
	320.8585		5	V 320.835 3
				Fe 320.8475 80
				Cr 320.8590 7
				Mo 320.8830 0.5
				Dy 320.871 5～7
	321.5595 Ⅱ	4.30	0.1	W 321.526 5～7
				Mo 321.5189 5～7
				Dy 321.5189 1
				Ho 321.537 3
	322.3324 Ⅱ	4.88	3	Th 322.3284 ≥10
				Dy 322.329 3
				Er 322.3308 0.5
	322.548 Ⅱ	4.14	0.05	
	322.9563 Ⅱ	4.74	2	Ta 322.9236 10
				Mo 322.9710 2
	323.6403 Ⅱ	4.21	0.3	Ti 323.6573 0.0007
				Dy 323.663 3～5
				Mn 323.6778 1～2
	323.8024 Ⅱ	5.17	5	V 323.7874 0.5
				Er 323.7979 0.7
				Th 323.8118 2
	324.7474 Ⅱ	4.80	1	Cu 324.7540 0.002
				Mn 324.7542 3
	325.4067 Ⅱ	4.14	0.5	Ti 325.4250 0.01
				Fe 325.4363 150
				Lu 325.431 0.01
	326.1695 Ⅱ	6.09	0.5	Th 326.1544 ≥10
				Tm 326.166 0.7
				Ti 326.161 0.001
	326.3366 Ⅱ	6.41	0.5	Ta 326.3404 5
				Ti 326.3686 1
	327.3886 Ⅱ	4.68	1	Cu 327.3962 0.005
				Sc 327.3619 0.03
				Hf 327.3655 10
	328.3463 I	5.76	0.5	Tm 328.340 0.5
				Rh 328.3573 5
	329.436 Ⅱ	5.74	1～2	
	331.2600 I	4.01	3	Dy 331.2729 3
				Sc 331.2736 0.5
	331.8984 I		5	Ta 331.8840 7
				Zr 331.9025 ≥10
	331.9584 Ⅱ	4.63	3	Tb 331.918 3
				Dy 331.9421 0.5
				Ho 332.024 0.7
	332.4660 Ⅱ	6.17	5～7	Tb 332.440 0.03

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Nb				Fe 332.4537 80
				Th 332.4754 1
	332.6619 I		7	Dy 332.642 3
				Co 332.6564 5
				Ti 332.6765 0.1
				Zr 332.6414 5
	332.9619		7	
	334.1974 Ⅱ	3.85	0.5	Ti 334.1875 0.007
				Dy 334.188 80
				Mo 334.691 1
	335.8417 I	4.04	0.5	Mo 335.812 1
				Cr 335.8501 0.1
				Hf 335.8303 10
	336.5584 Ⅱ	4.71	1	
	336.6956 Ⅱ		5	Co 336.7109 0.5
				Mo 336.691 3
	337.4090		2	Tb 337.441 5
				Ho 337.426 1
				Er 337.4174 0.2
	337.4925 I		3～5	Zr 337.4726 3
				Mo 337.4768 3
				Tb 337.503 0.5
	338.6244 Ⅱ	4.88	0.7	
	338.7928		10	Co 338.7173 7
				Ti 338.7877 0.01
				Zr 338.7872 3
	340.8678 Ⅱ	4.41	0.5	Mo 340.8634 10
				Sm 340.8668 ≥10
				Er 340.8678 2
				Cr 340.8756 0.05
	340.9188 Ⅱ	4.33	2	Co 340.9177 0.1
				Th 340.9273 5
	342.0631 Ⅱ	4.55	3	Tb 342.034 1
				Er 342.0183 2
	342.1162 Ⅱ	5.03	10	Cr 342.1213 0.1
				Pd 342.124 0.05
	342.5424 Ⅱ	4.99	0.5	Dy 342.505 3
				Tm 342.505 7
				Ho 342.535 0.3
	343.2701 Ⅱ	5.62	0.5	Tb 343.290 3
	345.397	4.93	2～3	Co 345.3505 0.003
				Tm 345.361 1
				Tb 345.406 0.3
				Yb 345.307 0.7
	347.8778 Ⅱ	4.83	2	Yb 347.884 0.3
				Rh 347.8906 5
				Hf 347.8990 3
	347.9564 Ⅱ	4.88	0.7	Zr 347.9392 3
				Hf 347.9285 1
	348.2951 Ⅱ	6.57	5	Tb 348.280 7
				Mn 348.2909 1～2
	348.4049 Ⅱ	4.32	5	Cr 348.415 0.5
	348.8832		3	Mn 348.8608 2
	351.0257 Ⅱ	5.20	1	Ni 351.0338 0.7
	351.5423 Ⅱ	4.80	2	Ho 351.558 0.2
	351.7671 Ⅱ	5.53	2	Ce 351.7380 5
				Mo 351.7557 5
				Dy 351.758 2
	353.5301 I	3.50	0.5	Ti 353.5412 0.7
				Hf 353.5545 0.7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Nb	357.5848 I	3.55	1~2	
	361.9513 II	4.41	0.5	Ni 361.9392 0.1
	361.9727 II	5.40	0.5	Yb 361.9809 3
	368.7971 II	5.52	0.1	Gd 368.7759 7
				V 368.8069 0.1
Nd	299.4734		5	Fe 299.4492 1~2
				Nb 299.4728 0.7
	308.0930 II		0.7~1	V 308.1004 1
	309.9515 II		1	
	313.3603 II		7~10	
	314.4839		5~7	Fe 314.4758 50
	315.6259		7	
	332.827 II		5	
	333.2174		10	Mg 333.2153 1
	333.5771		7	Fe 333.5768 100
	335.872		0.5	Gd 335.8628
	336.1773		0.7	Cr 336.1770 0.5
	341.7528		7	Fe 341.7843 100
				Tb 341.772 2
	342.363		0.5~0.7	
	343.2985		7	Co 343.3040 0.1
	343.897		5	Yb 343.884 2
	345.018		5	Fe 345.0330 80
	346.8420		5	
	348.1438		3~5	Cr 348.1303 0.5
	349.1364		7	Os 349.1495 2
	349.426		3~5	
	350.6028		7	Mo 350.5315 5
	351.2909		5	
	354.9370		1	
	359.2595 II		7	
	360.1321		10	
	364.5626		1	
	365.4156		5	
	366.2263 II		7	
	366.4649		1	
	367.1449		3~5	V 367.1205 0.7
	367.1660		3~5	Ti 367.1673 0.5
	368.5804 II		7	Fe 368.6003 125
Ni	231.6037 II	6.38	3~5	
	234.544 II		3	
	239.4516 II	6.85	3~5	
	240.517 II	8.75	7	
	241.305 II	6.99	7	
	241.6138 II	6.98	0.2	Rh 241.5841 5
	243.7888 II	6.76	7	Ag 243.7791 0.1
	247.315 II	6.87	5	
	250.584 II	8.55	7	
	251.0873 II	6.61	3	Rh 251.0655 3
				Fe 251.0836 50
				Nb 251.1005 5~7
				Co 251.1016 0.5
	254.590 II	6.72	5	Fe 254.5979 100
	299.2595 I	4.17	7	
	300.2491 I	4.16	0.5	
	300.3629 I	4.24	1	V 300.3248 1
	301.2004 I	4.54		Hf 301.220 0.5
				Dy 301.230 7~10
Ni	303.7935 I	4.11	1	
	305.0819 I	4.09	0.1	V 305.0730 7
				Tm 305.073 0.5
				Hf 305.0758 5~7
				Th 305.0989 ≥10
	305.4316 I	4.17	1	Mn 305.4462 10
				Hf 305.452 10
	305.7638 I	4.27	0.7~1	
	306.4623 I	4.16	5~7	Nb 306.4533 0.3
				Hf 306.468 5
				Pt 306.4712 0.5
	308.0755 I	4.24	7	Hf 308.0845 1
				Dy 308.0927 10
				Nd 308.0930 1
	308.7077 II	7.12	2	Tm 308.702 2
	309.7118 I	4.17	1	Tm 309.697 ≥10
				Nb 309.7122 2
				Ti 309.7186 0.5
				Mo 309.7201 10
	310.1554 I	4.11	0.7	Hf 310.1397 3
	310.1879 I	4.42	1	
	311.4124 I	4.09	10	Pd 311.4040 1
	313.4108 I	4.17	0.5	Tm 313.388 0.1
				Ho 313.440 1
				Fe 313.4111 125
	323.2963 I	3.84	3	Fe 323.3054 60
	323.4649 I	3.94	5	
	324.3058 I	3.85	5~7	Mo 324.3203 7
	331.5663 I	3.85	5	
	332.0257 I	3.90	5~7	Ho 332.024 5
				Th 332.0302 10
	332.2310 I	4.16	7~10	Fe 332.2477 80
	336.1556 I	3.80	1	Tb 336.124 1
				Ti 336.1263 0.0005
				Sc 336.1270 0.02
	336.6168 I	3.85	7	
	336.9573 I	3.67	0.2	Dy 336.927 7
				Fe 336.9549 200
	337.1993 I	3.84	7	Dy 337.176 3
	337.422 I	3.69	10	
	337.4642 I	3.69	7~10	
	338.0574 I	4.09	0.3~0.5	Mo 338.0215 2
				Ti 338.0280 0.01
				Sr 338.0711 0.5
	339.1050 I	3.65	1~2	Ho 339.075 1
	339.2992 I	3.67	0.5	Cr 339.2987 1~2
				Zr 339.3124 ≥10
	341.3478 I	3.80	10	
	341.4765 I	3.65	0.1	Zr 331.4661 7
				Mo 341.4422 7
				Ho 341.492 7
	342.3711 I	3.34	1	
	343.3558 I	3.63	0.7	Cr 343.3311 0.1~0.2
				Pd 343.3449 0.5
	343.7280 I	3.60	2	Mo 343.7216 3
	344.6263 I	3.70	0.3	Co 344.6085 2
	345.2890 I	3.69	1	
	345.8474 I	3.80	0.1~0.2	
	347.2545 I	3.67	2	
	349.2956 I	3.65	0.1	

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ni	350.0852	I	3.70	5	Ba 350.1116 0.3
	351.0338	I	3.74	0.7	Tb 351.010 5
					Nb 351.0251 1
	351.5054	I	3.63	0.2	Tb 351.504 5
	352.4541	I	3.54	0.05～0.07	Dy 352.461 7
					Mo 352.4646 3
					V 352.4715 5
	356.6372	I	3.90	0.2	Tm 356.6474 0.1
	357.1869	I	3.63	5	Fe 357.1996 60
	359.7705	I	3.65	5	
	361.0462	I	3.54	5	
	361.2741	I	3.70	7	Rh 361.2470 5
					Dy 361.2563 2
					Co 361.2641 0.1
					La 361.2741 7
	361.9392	I	3.85	0.1	Nb 361.9513 0.5
					Nb 361.9727 0.5
Os	225.5847	II	5.49	7	
	228.283	I		7	
	233.680	II	5.75	5	Co 233.6241 5
	236.735	II	5.72	5	
	242.3071	II	6.09	5	
	248.8548	I	5.62	10	
	258.0026	II	6.44	3	Nb 258.0285 5
					Co 258.0326 0.05
	250.9708	II		7	Rh 250.9697 ≥10
	268.9816	I	5.25	7	
	279.6727	I	4.77	5	Ta 279.6339 10
					Lu 279.663 0.5
					Mo 279.6777 7
	283.8626	I	5.00	0.7～1	Ta 283.824 ≥10
					Cr 283.8786 5
					Er 283.8714 3～5
	286.0956	I	4.97	7～10	Nb 286.1093 1
					Hf 286.1012 1～2
					Zn 286.0934 0.07
	290.9061	I	4.26	0.5	Mo 290.9116 0.7
					Ho 290.942 2
	291.2334	I	4.77	5	Fe 291.2158 150
	291.9794	I	4.58	7	Ho 291.959 1
					Hf 291.9594 2
					Th 291.9842 ≥10
	301.7247	I	5.19	≥10	Ti 301.719 0.01
	301.8039	I	4.11	2	
	303.0695	I	4.73	5	Sc 303.0769 0.1
					Zr 303.0918 ≥10
	304.0900	I	4.42	3	Cr 304.0846 0.05
					Mo 304.101 10
					Mn 304.0603 7
	304.2739	II	5.49	1～2	Nb 304.250 5
					Pt 304.2637 2
					Fe 304.2665 200
	305.866	I	5.80	0.3～0.5	Fe 305.9086 100
	306.2192	I	4.56	≥10	Tm 306.206 10
					Dy 306.2190 1
					Co 306.2201 ≥10
					Fe 306.2233 400
	306.6116	I	5.93	7	
	307.7720		5.39	5	Lu 307.760 0.005

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Os					Mo 307.7661 1
					Cr 307.7831 5
	308.4596	I	5.67	10	
	310.9381	I	4.74	7～10	Hf 310.9117 1
					Th 310.9022 7～10
					Sc 310.9341 0.3
					V 310.9372 7
	311.8326	I	7.11	10	V 311.8383 0.03
					Ho 311.851 0.5
					Cr 311.8652 0.05
					Lu 311.843 7～10
	313.0002			7～10	V 313.0267 0.05
					Ce 313.0456 1
	315.6248	I	4.57	2	
	317.3928	II	4.88	3	Mo 317.4777 5
					Ho 317.379 0.3
	318.698	II	5.30	7～10	Fe 318.6741 300
					Th 318.7002 2
	321.3312	II	5.49	1	
	323.2055	I	4.35	5	Sm 323.1938 10
					V 323.1950 7
					Er 323.2026 1
					Th 323.2123 2
					Ti 323.2280 0.07
	323.4196	I	5.67	≥10	Fe 323.3971 150
					Cr 323.406 3
					Ce 323.4161 7
					Ho 323.452 2
	326.2290	I	4.32	2	Hf 326.2474 7～10
	326.7200			3	
	326.7945	I	3.80	2	Sb 326.7502 0.7～1
					V 326.7702 0.02
					Mo 326.8193 7
	326.9209	I	4.50	10	Tm 326.900 0.5
					Dy 326.912 7
					Er 326.9411 0.5
					Ge 326.9494 1
	330.1559	I	3.76	0.3～0.5	Nb 330.1491 5
	339.7758	II		7	Mo 329.7688 7
	355.9786	I	4.57	5	
	356.0855	I	4.57	5	Ce 356.0798 5
					Yb 356.0727 0.5
					Co 356.0893 0.5
	360.4475	II	4.88	7	Sm 360.4275 5～7
P	253.399	I	7.22	10	
	253.561	I	7.22	3～5	
	255.325	I	7.18	3～5	Fe 255.3185 20
	255.490	I	7.18	5～7	W 255.5205 3
					Ta 255.4907 5
Pb	220.3505	II	7.37	≥10	
	247.6379	I	5.98	≥10	Pd 247.642 10
	261.3653	I	5.71	>10	
	261.4178	I	5.71	>10	
	266.3166	I	5.97	0.7～1	V 266.3248 5
					Co 266.3529 0.3
					Cr 266.3679 0.07
	280.2003	I	5.74	0.1	Ta 280.2071 7
	282.3189	I	5.70	7	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Pb	283.3069 I	4.37	0.3	
	287.332 I	5.63	2	
	357.2734 I	6.12	0.1	Zr 357.2473 0.05
				V 357.2496 3
				Sc 357.2523 0.003
	363.9580 I	4.38	0.2～0.5	
	368.3471 I	4.34	0.2～0.5	
	373.9947 I	5.97	0.5	
Pd	240.8736 II	10.56	5	Co 240.875 5
	243.1777 II		10	
	244.6182 I	8.44	0.5	
	244.6714 II	10.17	3	
	246.9254 I	9.52	0.5	
	247.001 II	9.52	0.5	
	247.1152 II	9.02	0.5	
	247.2512 II	10.46	3	
	248.6528 I	8.34	1	
	248.8921 I	8.09	0.5	Ta 248.8696 3～5
	249.878 I	8.96	0.5	Co 249.883 5
	285.4581 II	8.34	1	
	302.7910 I	5.05	2～3	Mo 302.7771 7
				Zr 302.8040 5
				V 302.8043 5
				Cr 302.8125 0.3
	306.5306 I	5.00	1～2	Sc 306.5106 0.02
				Nb 306.5264 0.3
	311.4040 I	4.94	1	Ti 311.4092 ≥10
				Ni 311.4124 10
	324.2703 I	7.06	0.05	
	325.1640 I	5.06	2	Sc 325.132 0.5
				V 325.1570 3
				Ti 325.1911 0.07
	330.2128 I	5.00	0.5	Ti 330.2096 ≥10
				I 330.2432
				Tm 330.245 0.1
	337.3001 I	4.64	0.5	Pt 337.2791 5
				Er 337.2750 0.005
				Ti 337.2800 0.0005
	340.4580 I	4.46	0.02	Fe 340.4359 50
				V 340.4832 2
				Zr 340.4832 3～5
	342.124 I	4.58	0.05	Nb 342.1162 10
				Cr 342.1212 0.1
	343.3449 I	5.06	0.5	Er 343.3131 7
				Cr 343.3311 0.5
				Ni 343.3558 0.7
	344.1396 I	5.05	0.3～0.5	Er 344.1135 5
				Dy 344.1453 7～10
				Tm 344.151 0.1
	346.0774 I	4.40	0.3	Mo 346.0784 7
				Ho 346.095 7～10
				Re 346.0971 0.03
				Tb 346.100 5
	348.1152 I	4.81	0.1	Zr 348.1146 0.3
	348.9772 I	5.00	1	Ti 348.9739 ≥10
				Ho 348.959 1
	351.694 I	4.49	0.07	Er 351.699 1
	355.3082 I	4.94	0.1	
	357.1155 I	4.72	0.3	
Pd	360.9548 I	4.40	0.05	
	363.4695	4.23	0.03～0.05	Sm 363.4271 1
				Er 363.4679 0.7
				Nd 363.4871 2
	369.0341 I	4.81	0.3～0.5	V 369.0281 0.5
Pr	297.6975		5	Ta 297.6542 10
				Mo 297.7270 10
	298.052		3	Fe 298.0539 70
				Sc 298.0752 0.1
				Hf 298.0810 7～10
	299.707		7	
	300.0454		1	
	301.068		7	Ta 301.0844 5～7
	302.9393		7	
	308.027		7	
	309.8503		10	Tm 309.859 1
	312.1571 II		7～10	Ti 312.1599 7
	317.2314 II		7	Cr 317.2079 5
				Mo 317.2370 3
	334.1473		2	Nb 334.1600 1
	335.7692		7	
	364.5660 II		5	Fe 364.5825 80
	366.0375		1	Mn 366.0404 5
	366.8477		1	
	368.5265		3～5	
	368.7200 II		1	
Pt	224.5518 II	6.68	5	
	242.4869 II	7.07	2	Co 242.493 10
	265.9454 I	4.66	0.7	C 265.96 7
				V 265.9606 10
	270.2399 I	4.68	3～5	
	270.5894 I	4.68	3	
	271.3127 I	5.82	10	
	272.9915 I	5.35	5	
	273.3961 I	4.63	2	
	276.9837 I	5.29	≥10	Mo 276.976 0.01
	277.4779 II	7.55	0.7～1	Tm 277.478 0.05
	279.4208 II	6.68	0.5	
	282.2270 II	12.0	3	
	283.0295 I	4.38	2	Cr 283.0468 0.07
	292.9794 I	4.23	2	
	297.9806		10	Cr 297.974 0.005
	299.7967 I	4.23	1	
	300.1169 II	6.37	7	V 300.121 0.5
	304.2637 I	4.18	2	Ta 304.2439 3
				Tb 304.250 5
	306.4712 I	4.04	0.3～0.5	Nb 306.4533 0.3
				Ni 306.4623 5～7
				Hf 306.468 5
	330.1861 I	4.57	3～5	Er 330.193 5
	337.2791		5	Pd 337.2001 0.5
				Er 337.2750 0.005
				Ho 337.279 0.7～1
				Ti 337.2800 0.005
	348.5267 I	4.81	5～7	Er 348.5169 0.7
				Co 348.5366 0.7
				Mo 348.5483 7
				Fe 348.5342 50

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%		
Rb	334.872	I	3.71	>10			
	335.089	I	3.71	>10			
	346.1574	II	23.01	>10			
	353.1602	II	20.44	>10			
Re	227.462	I	5.44	2			
	250.235	II	7.55	2			
	255.463	II	7.39	5	Ta	255.462	2
	260.850	II	6.53	0.3	Mn	260.843	0.5
	273.156	II	6.87	2			
	273.304	II	6.67	0.3			
	275.364	II	6.87	7			
	281.995	I	5.84	5			
	345.188	I	3.59	10			
	346.047	I	3.58	0.1	Mn	346.0328	1
					Tb	346.038	3~5
	346.4722	I	3.57	1	Yb	346.437	0.5
					Sr	346.4487	0.02
					Er	346.4536	1
	358.015	II	5.60	0.2			
Rh	233.477	II	7.40	7			
	241.5841	II	7.58	5	Ni	241.6138	3
	242.0979	II	7.67	7	Co	242.0762	0.5
	245.890	II	7.48	7			
	246.1036	II	7.32	7			
	249.0770	II	7.07	3			
	250.5104	II	7.40	5			
	251.0655	II	7.23	3	Ni	251.0873	3
					Fe	251.0836	50
	252.0533	II	7.00	2~3	Mn	252.0584	5~7
	260.917			5	Mo	260.922	0.3
	267.4441			7			
	270.5629	II	7.72	2	Mn	270.5731	5
					Co	270.5848	7~10
	271.5308	I	7.71	5	Nb	271.534	0.1
					W	271.534	7
	272.895	I	4.86	7~10			
	273.7400			1~2	Nb	273.7088	1
					Fe	273.7314	150
	276.654			≥10	Co	276.6221	7~10
					V	276.6455	5
					Cr	276.6540	0.007
	277.815	I	5.94	7	Cr	277.8060	3
					Fe	277.8221	80
	281.9626	II		7	Eu	282.077	2
	291.0171	II	7.40	3			
	328.055	I	3.96	5	Fe	328.0261	150
					Tb	328.0286	0.07
					Ag	328.0683	0.005
	328.3573	I	4.10	5	Tm	328.340	0.5
					Nb	328.3463	0.5
	332.3092	I	3.92	0.7~1	Ti	332.294	0.005
	337.2254	I	4.00	5	Sc	337.2151	0.005
					Tb	337.236	5
	339.685	I	3.64	0.7	Fe	339.6978	25
					Zr	339.6733	10
					Eu	339.658	5
	341.2274	I	5.62	7	Co	341.2339	0.05
	343.4893	I	3.60	0.05	Mo	343.4790	5
Rh	346.2040	I	3.91	1	Tm	346.220	0.01
	347.066	I	4.00	1			
	347.4780	I	4.00	1			
	347.8906	I	3.98	5	Nb	347.8778	2
					Yb	347.884	0.3
					Hf	347.8990	3
	350.2524	I	3.53	0.7	Co	350.2279	0.05
	350.7316	I	3.86	1	Lu	350.739	0.01
					Eu	350.7480	3
	352.8024	I	3.70	0.5	Ni	352.7982	7~10
	354.3948	I	4.20	2			
	359.6194	I	3.77	1~2	Ti	359.6052	2
					Ru	359.6179	5
					Tb	359.638	0.7
					Bi	359.6110	≥10
					Dy	359.6067	0.5
	359.7147	I	3.86	1			
	361.2470	I	3.87	5			
	362.6590	I	4.56	3	Tb	362.650	2
					Ta	362.6617	10
					Ho	362.670	2
	365.7987	I	3.57	0.5	Th	365.8069	1
					Ti	365.8100	0.7
	369.0704	I	3.76	1			
	369.2357	I	3.35	0.03			
	369.5525	I	5.34	2			
	370.0909	I	3.53	0.5			
Ru	240.2717	I	6.29	3			
	245.5530	II	6.31	3			
	245.6438	II	6.39	0.5			
	245.6568	I	6.31	0.5			
	264.8780	I	6.20	≥10	V	264.870	≥10
					Co	264.8635	1
	267.8758	I	5.76	3	V	267.8568	3
					Zr	267.8632	1~2
					Cr	267.8792	0.2
					Ta	267.8804	10
	269.212	I	5.86	3			
	282.2552	I	7.02	≥10	Cr	282.2371	0.07
					W	282.2572	7
					Hf	282.2677	3
	291.6255	I	4.40	7			
	291.852	II	8.62	10			
	292.7536	II	6.78	1			
	294.5668	II	6.61	0.7			
	296.555	II	6.72	1			
	298.8948	I	4.15	≥10	Cr	298.9194	0.1
					W	298.8885	≥10
					Bi	298.9029	1
					Sc	298.8952	0.005
	341.733	I	3.89	1			
	342.8309	I	3.61	3	Ho	342.813	0.5
					Er	342.8394	1
					Fe	342.8197	50
					Hf	342.8366	3
	343.6737	I	3.75	1~2	Nb	343.6962	3
					Er	343.6336	1
	349.8942	I	3.54	0.07~0.1	Sc	349.8912	2~3
					Ho	349.908	0.7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ru				Ti 349.9099 2～10
				Rh 349.8732 10
				Er 349.9104 0.01
	359.3022 I	3.79	5	Ho 359.313 3
	359.6179 I	3.70	5	Bi 359.6110 ≥10
				Ti 359.6052 2
	366.1353 I	3.53	2	
	367.2383 I		10	
	372.693 I	3.47	7	
Sb	231.1469 I	5.36	10	
	252.8535 I	6.12	0.5	V 252.836 5
				Si 252.8516 0.01
				Co 252.8967 0.1
	254.384		7	
	255.462		≥10	Ta 255.462 5
	259.8062 I	5.98	0.1～0.2	
	261.2301 I	7.03	7	
	265.2606 I	6.95	5	Mn 265.2485 3
				Al 265.2489 0.3
	267.0643 I	5.69	5	Er 267.0255 3～5
	268.2762 I	6.90	7	
	269.2253 I	6.63	10	
	271.8893 I	6.84	5	
	276.9939 I	5.69	1	Mo 276.9762 3
				Cr 276.9915 5
	287.7915 I	5.36	0.7～1	Ta 287.7686 7
				V 287.7688 5
				Cr 287.7978 3
	302.9807 I	6.12	1	Ti 302.9730 0.5
				Dy 302.9826 3
				Fe 303.0149 300
	323.2499 I	6.12	1	Ti 323.2280 0.07
				Os 323.2540 0.7
	324.1280		2	
	326.7502 I	5.82	0.7～1	Tm 326.741 1
				Mo 326.7639 7
				V 326.741 0.02
				Os 326.7945 2
Sc	254.5204 I		0.1	
	255.238 I	4.88	0.01	
	255.5799 I		0.05	Ti 255.5987 5
	256.0227 I	4.85	0.1	Fe 256.0272 80
	268.4233 I		5	Fe 268.4071 15
	269.9104 I	7.75	0.05	
	273.4089	7.70	0.1	
	278.2358 I		1	
	278.9169 I		0.5	
	280.1312 I		0.3	W 280.1051 ≥10
				Mn 280.1064 0.7
				Zn 280.1869 7
	281.9521 I		0.3	Er 281.9815 3
	282.6664 I	7.87	0.1	Tm 282.644 10
				Ho 282.663 ≥10
	286.671 I		3	Fe 286.6629 80
				Mo 286.6693 1
				Cr 286.6742 0.03
	291.303 I		1	
	297.4006 I		0.1	Nb 297.4098 0.1
Sc				Tm 297.429 10
				V 297.4969 ≥10
	297.9683 I		5	
	298.0752 I		0.1	Nb 298.0717 5
				Pd 298.052 3
	298.8952 I	4.17	0.005	Ru 298.8948 ≥10
	301.5364 I		0.5	Tm 301.529 0.5
				Dy 301.5074 10
				Cr 301.5510 3
	301.9350 I	4.13	0.3～0.5	
	303.0769 I		0.1	Mn 303.1063 1
				Zr 303.0918 ≥10
	304.5714 I	7.47	0.1	Th 304.5568 10
				Mo 304.5719 ≥10
	305.2929 I	7.48	0.1	Fe 305.3070 80
				Ta 305.2534 7
	306.5106 I	7.49	0.02	Cr 306.5067 ≥10
				Nb 306.5264 0.3
				Pd 306.5306 1～2
	308.256 I		1	Ta 308.236 10
				Dy 308.2515 10
				Co 308.2618 7
				V 308.2523 5
				Mo 308.2822 5
	309.242		7	Mo 309.2074 2
				Hf 309.2245 7
				Ta 309.2444 ≥10
				Al 309.2713 0.005
	310.7529 I		0.05	Mo 310.7549 5
				Cr 310.7572 5
	310.9341		0.3	Hf 310.9117 1
				V 310.9372 7
				Th 310.9022 7～10
				Os 310.9381 7～10
	312.2542 I		1	Er 312.256 0.03
				V 312.2895 0.5
				Au 312.2781 0.1
	312.8286 I		0.1	Dy 312.8409 5
				Mo 312.851 10
	313.3096 I		0.05	
	313.9729 I		0.01	Tb 313.964 3
				Hf 313.9653 5～7
				V 313.9745 0.5
				Fe 313.9908 40
				Co 313.994 3
				Mo 313.9871 ≥10
	319.1005 I		0.5	Ti 319.0874 0.002
				Nb 319.1096 0.5
				Ho 319.097 1
	319.937 I		0.1	Ta 319.9225 10
				Fe 319.9525 150
				Ti 319.9975 0.05
	325.132 I		0.5	Fe 325.1235 150
				Dy 325.126 0.5
	325.5678 I		0.5	
	326.9904 I	3.79	0.1	
	327.3619 I	3.81	0.03	Mo 327.3582 ≥10
				Hf 327.3655 10
				Th 327.3884 7
				Nb 327.3886 1

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Sc	331.1708 Ⅱ		0.7	Cr 331.1925 1
				Lu 331.111 0.5
	331.3539 Ⅱ		0.1	Mo 331.3624 3
				Dy 331.331 5
				Tb 331.3650 0.7
				Zr 331.3689 ≥10
	331.7038 Ⅱ		0.1	Fe 331.7121 80
	332.0422 Ⅱ		0.3	Ho 332.024 7
	333.107 Ⅱ		0.1	Mo 333.090 10
				Ta 333.1007 3~5
	335.2048 Ⅱ		3	Hf 335.2055 1
	335.3734 Ⅱ	4.01	0.005~0.007	Dy 335.3595 3
	335.9679 Ⅱ	3.69	0.1	Lu 335.958 0.5
	336.1270 Ⅱ	3.68	0.02	Tb 336.124 1
				Ti 336.1263 0.0005
				Ni 336.1556 1
	336.3501 Ⅱ		0.7	Mo 336.3783 7
	336.8946 Ⅱ	3.68	0.1	
	337.2151 Ⅱ	3.69	0.005	Rh 337.2254 5
				Tb 337.236 5
	337.8209 Ⅱ		1	Cr 337.8337 1
				Mo 337.8461 ≥10
				Th 337.8579 5
				Dy 337.843 10
	337.918 Ⅱ		0.1	Hf 337.8928 ≥10
				Nb 337.9300 10
				Cr 337.9371 3
	342.9483 Ⅰ		3~5	
	343.5555 Ⅰ		5	
	349.8912 Ⅰ		2~3	Er 349.9104 0.01
				Rh 349.8732 10
				Ru 349.8942 0.1
				Ho 349.908 0.7
	353.5729 Ⅱ	3.82	0.01	Ti 353.5412 0.7
				Tm 353.5520 0.5
				Hf 353.5545 0.7
	355.8538 Ⅱ	3.49	0.01	Fe 355.8518 300
	356.7701 Ⅱ	3.47	0.007	
	357.2523 Ⅱ	3.49	0.005~0.007	Th 357.2399 ≥10
				Zr 357.2473 0.05
				W 357.2475 3
				Mo 357.2592 3~5
				Pb 357.2734 0.1
	357.6340 Ⅱ	3.47	0.003	Mo 357.6174 2
				Dy 357.6250 0.5
	358.0927 Ⅱ	3.46	0.007	Fe 358.1195 600R
	361.3836 Ⅱ	3.45	0.001~0.002	Tb 361.368 2
				W 361.3790 5
				Dy 361.4083 5
	363.0740 Ⅱ	3.42	0.002	Dy 363.020 0.7
	364.2785 Ⅱ	3.40	0.007~0.01	
	364.5311 Ⅱ	3.42	0.01	La 364.5414 0.2
				Dy 364.5416 0.01
	365.1798 Ⅱ	3.40	0.01	Fe 365.1469 200
	366.654 Ⅱ		7	
	367.8342 Ⅱ		0.5	
Si	243.5159 Ⅰ	5.87	0.05	
	245.2136 Ⅰ	5.08	0.5	
	250.6899 Ⅰ	4.95	0.01~0.03	Co 250.6462 0.2
	251.4331 Ⅰ	4.93	0.007	
	251.612 Ⅰ	4.95	0.003	Mo 251.6109 2~3
				Ti 251.600 10
	251.921 Ⅰ	4.93	0.01	
	252.4118 Ⅰ	4.92	0.01	
	252.8516 Ⅰ	4.93	0.01	V 252.8468 5
				Sb 252.8535 0.5
	254.183 Ⅲ	15.14	0.7	
	253.2378 Ⅰ	6.80	1~2	
	257.713 Ⅰ	6.72	1	
	263.1310 Ⅰ	6.62	0.5	
	288.1578 Ⅰ	5.08	0.03~0.05	Th 288.1147 ≥10
Sm	287.845		3	Cr 287.845 0.05
	288.876		5	Cr 288.874 0.1
				Ti 288.863 0.05
				Ti 288.893 0.05
	323.9638 Ⅱ	4.31	≥10	Fe 323.9436 300
				Dy 323.959 7
				Ti 323.966 0.07
				V 323.9834 10
	324.717		5	
	326.939		5	
	330.6616 Ⅱ	4.24	7	Zr 330.6278 1
				Fe 330.6354 150
	332.1184 Ⅱ	4.11	10	
	340.2463 Ⅱ	4.02	7	Fe 340.2262 150
				Tb 340.233 1
				Cr 340.2399 5
				Ti 340.2422 5
				Zr 340.2523 7
	356.8258 Ⅱ	3.96	1	
	358.2683 Ⅱ		7	
	359.2595 Ⅱ	3.83	1	
	360.4276 Ⅱ	3.93	5~7	
	360.9484 Ⅱ	3.71	3	
	363.4271 Ⅱ	3.59	7	
	367.0503 Ⅱ	3.48	5	
	369.3996 Ⅱ	3.35	7	
Sn	235.4845 Ⅰ	5.47	1	
	236.8226 Ⅱ		5	
	242.1693 Ⅰ	6.18	0.1	
	242.9495 Ⅰ	5.51	0.1	
	270.6510 Ⅰ	4.78	0.01	
	276.1776 Ⅰ	4.91	7	
	281.3582 Ⅰ	5.47	3	
	283.9989 Ⅰ	4.78	0.07	Ti 283.980 7
				Cr 284.0021 0.07
	285.0618 Ⅰ	5.41	0.1	
	286.3327 Ⅰ	4.32	0.1~0.2	Mo 286.3121 0.7
				Fe 286.3435 80
	300.9147 Ⅰ	4.33	0.07~0.1	Fe 300.9092 60
	303.2775 Ⅰ	6.21	1	
	303.4121 Ⅰ	4.30	0.03~0.05	Th 303.4069 5
				Cr 303.4190 5
				V 303.4822 0.07
	317.5019 Ⅰ	4.33	0.03	Ti 317.480 7
				Ho 317.486 0.5
				Mo 317.5049 2

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Sn	326.2328	Ⅰ	4.87	0.05	Mo 326.2188 5~7
					Os 326.229 10
	328.351	Ⅱ		0.1	
	333.0594	Ⅰ	4.79	0.5~1	Mo 333.090 10
					Mn 333.067 0.7
	335.2435			0.1	
Sr	336.6333	Ⅰ	5.53	3	Ni 336.6168 2
	338.0711	Ⅱ	6.61	0.5	Ni 338.0574 0.5
					La 338.0910 0.05
					Nb 338.0938 1
	346.4457	Ⅱ	6.62	0.02	Yb 346.437 0.5
					Er 346.4536 1
					Re 346.4722 1
	347.4887	Ⅱ	6.61	0.7	Rh 347.478 0.5
Ta	233.198	Ⅱ		5	
	236.424	Ⅱ		10	
	238.706	Ⅱ	5.74	5	
	240.063	Ⅱ		3	
	241.6892	Ⅱ		5	
	243.2701	Ⅱ	5.86	5	
	248.8397	Ⅰ	6.36	5	Fe 248.8148 100
	250.1985			7~10	
	253.2125	Ⅱ	5.22	5	Co 253.2175 7
	255.4907	Ⅱ	5.40	5	P 255.493 5~7
					W 255.5205 3
	255.7709	Ⅰ	6.30	7	Fe 255.7502 50
					Mn 255.7537 7
	257.737	Ⅰ	5.30	2	
	258.4027	Ⅱ		3	Nb 258.3986 0.7~1
					Ni 258.3995 10
	258.4691			10	
	259.3660	Ⅱ	5.33	3	Fe 259.3726 70
					Mn 259.3729 0.01
					Nb 259.3764 10
	259.4247	Ⅱ		5	
	259.5586	Ⅱ	4.77	10	Mn 259.561 7~10
	259.6450	Ⅱ	5.10	5	
	260.3573	Ⅱ	5.53	1~2	Mn 260.3719 5
					Fe 260.9504 80
	260.7840	Ⅱ		7	V 260.798 10
	263.379	Ⅱ	6.96	10	Mo 263.3507 ≥10
	263.5583	Ⅱ		1~2	Ti 263.5633 ≥10
					Hf 263.579 5~7
					Fe 263.5808 200
	264.4598	Ⅱ	6.26	5	Ti 264.4264 10
					Mo 264.4353 0.7
					V 264.4355 10
	264.5100	Ⅰ	6.29	≥10	
	264.677	Ⅰ	5.37	10	Mo 264.6488 1
					Ni 264.7056 ≥10
	265.1221	Ⅱ	5.22	5	Mn 265.0994 7
					Nb 265.1112 3
					Hf 265.1165 5
					Ge 265.1275 0.1
	265.3274	Ⅰ	4.91	5	Mo 265.3349 0.7
					W 265.3567 10
					Cr 265.3586 0.3
	266.5935	Ⅱ		7~10	
Ta	267.449			≥10	
	267.5901	Ⅱ	5.18	2	Nb 267.5944 3
					Au 267.595 0.05
	268.006	Ⅱ	5.33	3	Nb 268.0075 5
	268.0665	Ⅱ		3~5	
	268.511	Ⅱ	4.62	1	Hf 268.522 >10
	268.924	Ⅰ		3	Cu 268.930 1
	269.4759	Ⅰ	5.35	3	Co 269.4680 0.7~1
	270.280			7	
	270.9274	Ⅱ	5.78	3~5	Fe 270.9056 100
	271.4674	Ⅰ	4.56	7	Co 271.4418 1
	273.625	Ⅰ	4.77	10	
	275.2489	Ⅱ	4.83	3	
	276.1676	Ⅱ	4.62	3	Mo 276.1533 10
					Fe 276.1813 200
					Er 276.1905 5
	277.183		6.70	3	
	277.5877	Ⅰ	4.46	10	V 277.577 7
	278.4967	Ⅱ	5.15	3~5	Mo 278.4992 1
	279.1370	Ⅱ	5.10	5~7	Mo 279.1540 7
	279.7760	Ⅱ	6.19	3	Nb 279.7693 5
					Th 279.7740 5
					V 279.7795 5
	281.7101	Ⅰ	5.61	5~7	Mo 281.7510 3~5
	282.8579	Ⅱ	8.26	5	Fe 282.8634 80
	284.351	Ⅱ	6.61	7	Cr 284.3252 0.01
					Fe 284.3632 100
	284.4463	Ⅱ	4.48	3	Zr 284.4579 5
					Nb 284.46 10
	285.0985	Ⅰ	5.04	5	Mo 285.0674 7
	285.2355	Ⅱ	6.60	10	Hf 285.2012 3
					Mg 285.2129 0.007
					Fe 285.213 80
	286.741	Ⅱ	6.55	7	Ho 286.7648 0.01~0.02
	287.7686	Ⅱ	5.51	7	V 287.7688 5
					Sb 287.7915 1
					Cr 287.7978 3
	288.1232			7	
	290.2046	Ⅰ	5.92	7~10	Ti 290.194 ≥10
	290.4074	Ⅰ	5.58	10	
	291.896	Ⅱ	6.38	7	Mo 291.8828 5
	293.2695	Ⅰ	5.74	≥10	V 293.2323 3
					Th 293.252 1
					In 293.2624 1
					Nb 293.2662 10
					Cr 293.2705 5
	293.3550	Ⅰ	4.22	7	V 293.3835 ≥10
					Cr 293.3970 3
	294.0215	Ⅰ	5.54	7	Mo 294.0101 7
					Hf 294.0772 5
	295.1918	Ⅰ	4.44	10	Lu 295.169 0.5
					Ti 295.2081 0.1
	295.299	Ⅱ	5.40	5~7	Eu 295.268 5
					Ho 295.311 0.7
	295.684	Ⅱ	6.14	7	Mo 295.6902 3
	296.3322	Ⅰ	4.43	7~10	Mo 296.3794 5
	296.5133		4.18	1	Fe 296.5037 50
	297.626	Ⅱ	5.74	5~7	
	301.0844	Ⅱ	4.76	5~7	Pd 301.068 7

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%		
Ta	304.206	Ⅱ	4.58	3	Fe	304.2022	100
					V	304.2264	5
					Pt	304.2627	2
	304.2439			7			
	305.2534	Ⅱ		7	Mo	305.2320	7
					Dy	305.2324	7
	305.6615	Ⅱ	6.19	5	V	305.6334	5
					Ce	305.6334	7～10
					Lu	305.672	0.02
					Ti	305.6740	3
	308.2447			10	Mo	308.2220	5～7
					Al	308.2155	0.003
					V	308.2523	5
					Co	308.2844	7
	308.776	Ⅰ	5.22	5～7	Mo	308.7621	0.2
					Cr	308.7884	3～5
					Ti	308.8025	0.01
	312.7765	Ⅱ	5.17	3	Nb	312.7526	0.2
					Ti	312.7883	10
	313.5893	Ⅱ	5.16	7			
	313.029	Ⅰ		7～10	Ce	313.0344	1
					Ho	313.038	1
					Be	313.0416	0.0001
	314.2955	Ⅱ	5.15	7～10	La	314.2762	3
	327.4458			≥10			
	327.4947	Ⅱ	4.18	5			
	331.1162	Ⅰ	4.44	5			
	331.8840	Ⅰ	4.43	7	Nb	331.8984	5
					Zr	331.9025	≥10
	333.1007	Ⅰ	5.24	3～5	Mo	333.090	10
					Sc	333.107	0.1
	333.2411	Ⅰ	4.86	7～10			
	337.9515	Ⅱ	4.18	7			
	339.8327	Ⅰ		7			
	343.0938	Ⅱ	4.01	3～5	Tm	343.020	1
	344.6916	Ⅱ	5.17	7	Dy	344.6001	0.5
					K	344.6722	>10
	357.3438	Ⅱ	4.93	7～10	Nd	357.3183	2
					V	357.3516	5
					Ir	357.3724	0.01
Tb	289.141			5	Ti	289.1066	3
					Th	289.1254	10
					Mo	289.1275	5
					Mn	289.1321	5
					Yb	289.138	0.3
					V	289.1642	0.07
	304.497	Ⅱ		5			
	305.324	Ⅱ		1	Fe	305.344	50
					V	305.389	1
	307.005	Ⅱ		1			
	307.260	Ⅱ		1	Er	307.252	0.1
					Hf	307.2877	5
					Dy	307.2920	10
	307.886	Ⅱ		0.3	Ti	307.8645	0.002
					Th	307.8832	1
	308.236	Ⅱ		0.5	Th	308.2176	7
					Mo	308.2220	5
					Al	308.2115	0.005
					V	308.2523	5
Tb	308.958	Ⅱ		0.7	Ti	308.9401	0.07
					Co	308.9595	7
					Er	308.9686	10
	310.297	Ⅱ		2	Er	310.2686	10
					Ta	310.3351	≥10
	311.362			5	Er	311.3536	0.5
					V	311.3567	1
	311.726			5	Mo	311.7545	2
	313.964	Ⅰ		3	Sc	313.964	3
					Hf	313.9635	5～7
					V	313.9745	0.5
					Mo	313.9871	≥10
	314.667	Ⅱ		3	V	314.6812	3
	314.821			3	Ti	314.8036	0.2
					Mo	314.8179	10
	317.466	Ⅱ		1			
	318.054	Ⅰ		1			
	319.956	Ⅱ		0.5			
	321.893	Ⅱ		0.3			
	321.995	Ⅱ		0.1	Fe	321.9810	
	323.003	Ⅱ		2	Mo	322.9710	2
	323.106	Ⅱ		2	Ti	323.1315	1
					Fe	323.0967	200
	325.234	Ⅱ		0.5	Ti	325.1991	0.07
					Mo	325.233	7
	326.810			3	Os	326.7945	3
					V	326.7742	0.02
					Mo	326.893	7
	327.419	Ⅱ		7	Ti	327.5293	10
					Ta	327.4947	5
	328.028			0.3	Dy	328.010	1
					Fe	328.0261	150
					Hf	327.998	3
					Er	328.022	1
					Ti	327.9995	0.7
	328.140	Ⅱ		0.5	Mo	328.2909	7
					Ho	328.307	1
	328.504	Ⅱ		0.1	Mo	328.5024	7
					V	328.5024	5
					Zr	328.5024	5
	328.755	Ⅰ		3	Mo	328.7202	5
					Ti	328.2655	0.01
	329.307	Ⅰ		0.1			
	329.866	Ⅱ		3			
	330.780			1			
	332.115	Ⅱ		0.7	Ho	332.111	2
					Sm	332.1184	10
					Mo	332.0902	2
					Th	332.1453	5
					Be	332.1343	0.0005
	332.440	Ⅱ		0.03	Fe	332.4537	80
					Nb	332.4660	5～7
	332.908	Ⅱ		0.5	Mo	332.925	2
					Fe	332.8867	
	334.942	Ⅱ		0.1	Ti	334.9406	0.0005
					Nb	334.9348	5
	336.124			1	C	336.109	
					Sc	336.1270	0.02
					Tm	336.1213	0.05
					Ni	336.1556	1

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Tb				Ti 336.1213 0.001
	336.424		0.5	Ho 336.426 2
	337.014		0.7	Nb 337.0158 0.7
				Mo 336.9931 7
				Os 337.0202 ≥10
	337.150 Ⅱ		1	Ti 337.1454 0.1
				Mo 337.1692 5
				Dy 337.176 3
	337.441		5	Ho 337.426 1
				Er 337.4170 0.2
				Nb 337.4090 2
				Tm 337.451 1
	337.503 Ⅱ		0.5	
	337.886 Ⅱ		0.7	
	338.015		5	Mo 338.0215 2
				Ti 338.0280 0.01
	338.280 Ⅱ		2	Cr 338.2683 0.1
				Ag 338.2891 0.007
	340.233 Ⅱ		1	Fe 340.2262 150
				Cr 340.2399 5
				Ti 340.2422 5
				Sm 340.2463 7
				Zr 340.2523 7
	340.424		2	Mo 340.4342 5
				Fe 340.4359 50
				V 340.4425 ≥10
				Hf 341.0171 0.5
				Nd 341.0234 2
				Zr 341.0248 1
				Ho 341.025 0.5
				Mo 341.062 3
				Dy 341.072 2~3
	341.376 Ⅱ		0.7	Hf 341.374 10
				Dy 341.3794 0.3
	341.772		2	Er 341.7638 2
				Nd 341.7525 7
				Fe 341.7843 100
	342.034 Ⅱ		1	Mo 342.0037 ≥10
				Er 342.0183 2
				Nb 342.0630 3
	345.406 Ⅱ		0.3	Nb 345.397 2~3
				Er 345.4318 3
				Yb 345.407 0.7
	346.803 Ⅱ		1	Th 346.8221 7~10
				Nb 346.8127 ≥10
	347.282 Ⅱ		0.3	Ni 347.2545 0.1
	348.017 Ⅱ		3	Nb 348.0213 7
	348.280		5	Mn 348.2909 1
				Nb 348.2951 2
	350.084 Ⅱ		0.5	Ni 350.0852 10
	350.745 Ⅱ		0.5	Th 350.7522 3
				Lu 350.739 0.007
	350.917 Ⅱ		0.01	Ru 350.9201 0.05
				Zr 350.9323 ≥10
				Ho 350.935 3~5
	351.976 Ⅱ		0.7	Ni 351.9766 1
	352.366 Ⅱ		0.1	Co 352.3434 0.2
				Nd 352.3625 5
	353.794 Ⅱ		1	V 353.8241 ≥10
	354.024 Ⅱ		0.07	Hf 356.1664 0.7~1
Tb				Ti 356.1575 7~10
	355.976		1	
	356.851 Ⅱ		0.5	Sm 356.8288 2
	357.920 Ⅱ		0.2	
	359.638 Ⅱ		1	Mo 359.6351 7
				Rh 359.6194 1~2
				Bi 359.6110 ≥10
				Ti 359.6052 2
				Ru 359.6179 5
	359.806		2	
	360.044 Ⅱ		0.2	
	362.650 Ⅱ		7	
	364.166 Ⅱ		1	
	365.040 Ⅱ		0.2	
	365.488 Ⅱ		0.7	
	365.888 Ⅱ		0.2	
	367.635 Ⅱ		0.01	
	367.956		0.3	
	368.226 Ⅱ		0.3	
Te	238.325 I	5.78	3~5	
	238.576 I	5.78	3~5	
	276.967 I	5.78	≥10	
Th	255.520		10	
	256.436 Ⅱ	6.0	2	Tb 256.431 2
	256.5597		5	
	257.1612		2	Nb 257.1326 5
				Zr 257.1391 0.7
				Hf 257.1670 1
	259.705 Ⅱ	4.77	10	
	272.933 Ⅱ	5.66	7	
	275.2172 Ⅱ	4.69	5	Zr 275.2206 3~5
				Ta 275.2295 5
	276.8848 Ⅱ	5.24	2	V 276.8556 0.7~1
				Ni 276.8785 10
				Fe 276.8934 200
	277.1515 Ⅱ		7	V 277.1404 5
				Nb 277.1404 10
	277.4072		7~10	Hf 277.4016 2
				V 277.4276 5
				Fe 277.4691 50
	279.7740 Ⅱ	4.98	5	Ta 279.7760 3
				Fe 279.7775 80
				V 279.7795 7
	283.232 Ⅱ	4.89	0.2	Mo 283.2073 5
				Ti 283.2160 3
				Fe 283.2436 200
				Cr 283.246 0.1
	284.2815 Ⅱ	4.55	7	Nb 284.2648 0.7
				Ta 284.2815 ≥10
	285.1261 Ⅱ	4.53	7	Ti 285.1102 3
				Hf 285.1206 2~3
				Cr 285.1356 0.07~0.1
	286.137		7	
	287.0413 I	4.55	3	Cr 287.0436 0.1
				V 287.0547 5~7
	288.4295 Ⅱ	4.85	3	Ti 288.4107 5
	288.5045 Ⅱ		2	V 288.4785 0.2
				Mn 288.5125 ≥10

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%	元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Tb	288.7821 Ⅱ		3	Fe 288.7807 60	Th				Tb 307.886 0.3
	289.671 Ⅱ	5.50	1			308.022 Ⅱ		1	Nb 308.0350 0.7~1
	289.893 Ⅱ	4.4	0.5	Hf 289.8709 1		308.2176 Ⅱ		7	Er 308.208 ≥10
				Bi 289.8975 1					Al 308.2115 0.005
	291.0597 Ⅱ	4.77	10	Ho 291.035 1					Mo 308.2220 5
				Er 291.0357 0.03					Tb 308.236 5
				Nb 291.0587 0.3		308.335 Ⅱ	5.35	5	V 308.3214 7
	291.9842 Ⅱ	4.80	≥10	Ho 291.959 1					Fe 308.3742 500
				Hf 291.9594 2		308.8473 Ⅱ	4.92	5	Tb 308.843 5
				Os 291.9794 7		309.796 Ⅱ	4.9	1	Mo 309.7689 10
	292.505 Ⅱ		3	Zr 292.4792 3		310.2666 Ⅰ	4.75	7	Ho 310.268 2
				Eu 292.5035 7					Er 310.2686 ≥10
				Ta 292.5265 10		310.5053 Ⅱ		5	Dy 310.5001 7
	292.8256 Ⅱ	5.27	5	Ho 292.929 2					Ti 310.5084 0.1
				Mo 292.9493 ≥10		310.7029 Ⅰ	4.83	10	Er 310.6787 2
	293.252 Ⅱ	4.9	1	V 293.2323 3~5		310.8298 Ⅱ		1	Ho 310.833 2
				In 293.2624 1		311.0022 Ⅱ	4.81	7	Ti 311.0095 0.1
				Nb 293.2662 7~10					Sc 311.0238 0.5
				Ta 293.2695 ≥10		311.235 Ⅱ	4.9	1	Er 311.203 0.7
				Cr 293.2705 5					Ti 311.205 3~5
	294.2862 Ⅱ		3	Ti 294.313 7~10					Mo 311.2124 7
				Th 294.2862 3		311.6476 Ⅱ		7	Tb 311.6288 2
	296.8685 Ⅰ		5	Mo 296.8774 0.7~1					V 311.6476 7
				Hf 296.8812 0.5					Fe 311.6590 150
	297.864 Ⅱ	4.3	0.7~1	Mo 297.8609 5					As 311.663 10
	298.1362		5	V 298.1201 1~2		311.9484 Ⅱ	4.45	2	Fe 311.9494 80
				Fe 298.1446 200					Tb 311.962 5
	298.8234 Ⅱ	4.69	5	Mo 298.7920 3~5		312.2962 Ⅱ	4.73	2	Er 312.265 0.03
				V 298.8021 3~5					Sc 312.2954 1
				Cr 298.8649 2~3					Tb 312.305 5
	299.3803 Ⅰ	4.91	1	Bi 299.3342 2~3		312.4388 Ⅱ	4.73	1	Tb 312.454 5
				Mo 299.3515 5		313.9307 Ⅱ		3	
	299.5270		5	Cr 299.5103 1~2		314.6041 Ⅱ	4.70	1	Tm 314.616 0.1
	299.9093 Ⅱ		2						Dy 314.6165 5
	302.6580 Ⅱ		5	Co 302.6371 7					V 314.6230 2
				Fe 302.6461 200		314.8040		3	
				Cr 302.6647 0.3		315.4730 Ⅱ	4.76	1	Co 315.4678 0.5
	303.4069 Ⅱ	5.13	5	V 303.3822 0.07					Nb 315.4815 3
				Sn 303.4121 0.05		316.2836 Ⅱ	5.12	10	Ti 316.2570 0.003
				Cr 303.4190 5					Hf 316.2611 2
	303.5113 Ⅱ		7	Nb 303.495 2					Dy 316.2824 1
				Mn 303.5365 3~5		317.5730 Ⅱ	4.73		Fe 317.5447 200
	304.9095 Ⅱ	4.62	5	V 304.8892 5		318.0199 Ⅱ	4.08	0.7~1	Ir 318.0174 5
				Dy 304.9133 10					Fe 318.0226 300
				Mo 304.929 5					Nb 318.0290 0.07
				Ho 304.938 2		318.8188		1	
	306.0182 Ⅱ		7	Dy 306.000 2		321.6625 Ⅱ	4.9	0.7	Cr 321.656 0.1
				Ta 306.0289 ≥10					Dy 321.663 0.5
	306.1703 Ⅱ		7	Er 306.1683 7					Ho 321.667 7
				Co 306.1819 0.7~1					Y 321.6682 0.03
	306.3026 Ⅱ		3	Ce 306.3010 1		322.1293 Ⅱ	4.3	0.3	Ce 322.170 5
				Nb 306.3130 10					Ho 322.142 3
				V 306.3247 0.7					Dy 322.150 2
	306.7734		1	Mo 306.7642 5~7		322.5359 Ⅱ	5.05	5	Dy 322.508 7~10
				Bi 307.6716 0.005		322.8969 Ⅱ	4.75	1	Zr 322.8810 5
	307.0821 Ⅱ		5	Mo 307.0619 1		323.2123 Ⅱ	4.9	2	V 323.1950 7
	307.2120		1	Ti 307.2107 0.02					Tb 323.200 1~2
				Co 307.2344 5					Er 323.2026 1
				Er 307.252 0.1					Os 323.2055 5
	307.8832 Ⅱ	4.53	0.7	Ti 307.8645 0.002					Ti 323.2280 0.07

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Th	323.5843 Ⅱ	4.60	5	Dy 323.590 1
	323.8118 Ⅱ		2	Er 323.7978 0.7
				Nb 323.8024 5
				Mo 323.8399 1~2
				V 323.7874 0.5
	325.6273 Ⅱ		7	In 325.609 0.005
				Mn 325.6173 0.7~1
				Mo 325.6210 7
				Dy 325.625 1
	325.7935		10	Cr 325.7822 3
				V 325.7889 5
				Tm 325.804 0.1
	326.2671 Ⅱ	4.56	7~10	Dy 326.279 1
				Er 326.280 1
				Fe 326.2892 80
	328.2610 Ⅱ	4.76	≥10	Er 328.6754 5
				Fe 328.6755 400
	329.059 Ⅱ	4.3	0.5~0.7	V 329.0238 10
				Cu 329.0544 7
				Mo 329.0823 2
	329.2518 Ⅱ	4.58	3	Mo 329.2312 0.5~0.7
				Fe 329.2590 150
	330.049 Ⅱ	4.9	1	
	331.025 Ⅱ	4.52	3	
	331.3650 Ⅱ	4.4	0.7	Sc 331.3539 0.1
				Mo 331.3624 3
				Er 331.3653 1
	331.4831 Ⅱ		7	Cr 331.4563 0.7
				Fe 331.4742 200
	332.1453 Ⅱ	4.24	5	Mo 332.1196 10
				Tb 332.115 0.7
				V 322.1538 5
				Ti 332.1700 0.07
	332.513 Ⅱ	4.24	1	
	336.1739 Ⅱ		7	V 336.1508 5~7
				Ta 336.1640 7
				Cr 336.1770 0.7~1
	336.4698		10	Er 336.443 0.03
	337.039		10	Tb 337.014 0.7
				Nb 337.0158 5
				Os 337.0158 7
				Er 337.059 1~2
	337.1800		10	
	337.8579		5	Sc 337.8209 0.7
				Cr 337.8337 1
				Dy 337.843 10
				Fe 337.8685 80
	339.204 Ⅱ	3.85	1	Er 339.199 0.1
	340.2031		5	Ho 340.217 2
				Fe 340.2262 150
	341.8931		5	
	342.7995		3	
	343.1816		5	
	343.4000 Ⅱ	3.84	5	
	343.5979 Ⅱ	3.60	5	Cr 343.6187 0.7~1
	343.8953 Ⅱ	5.25	5	Yb 343.884 2~3
				Mo 343.8871 5~7
				Dy 343.8952 0.02
	343.9714 Ⅱ		5	
	346.2855 Ⅱ	4.78	7	Co 346.2808 0.07
Th	346.3722 Ⅱ	5.22	7	
	346.8221 Ⅱ		10	Tb 346.803 0.3
				Nb 346.8127 ≥10
				Nd 346.816 0.5~0.7
				Dy 346.8435 3
	351.1674		5	
	353.875 Ⅱ	6.0	3	
	357.5323		5	
	360.1040 Ⅱ		5	
	360.3208		3	
	362.5628 Ⅱ		7	
	362.5940		7	
	365.9513	4.52	1	
	367.6694		7	
	374.119 Ⅱ	3.50	0.5	
Ti	251.60 Ⅱ	9.70	2	Si 251.6123 0.003
	252.78 Ⅱ	9.65	1	V 252.7903 5
				Nb 252.7920 7
	253.1251 Ⅱ	5.03	1	Hf 253.1193 7
	253.587 Ⅱ	5.00	7	
	254.002 Ⅱ	9.61	5	
	255.5987 I		5	Sc 255.5799 0.05
	258.0817		10	
	264.1099 I	4.69	7	Mo 264.115 7
	264.4264 I	4.71	10	Fe 264.400 150
				Mo 264.4353 0.7
				V 264.4355 10
				Mn 264.4353 0.7
				Ta 264.4598 5
	264.6637 I	4.73	7	Nb 264.6258 1
				Ta 264.677 10
	275.170 Ⅱ	8.41	3	Hf 275.1812 3
	276.482 Ⅱ	5.56	5	
	280.061 Ⅱ	8.30	7	Ta 280.0572 ≥10
				Cr 280.0771 0.1
	280.2500 I	5.32	7~10	Mo 280.2354 7~10
				Mg 280.2695 0.002
				Co 280.2706 5
	280.501 Ⅱ	8.08	3	
	281.0302 Ⅱ	8.10	1	V 281.0269 1
	281.7866 Ⅱ	8.12	0.7	
	282.8150 Ⅱ	8.14	0.7	
	282.89 Ⅱ	8.05	0.2	Fe 282.8634 80
				Ta 282.8634 80
	283.2160 Ⅱ		3	Mo 283.2073 5
				Th 283.2319 0.2
				Fe 283.2436 200
				Cr 283.246 0.1
	283.930 Ⅱ	8.12	7	Sn 283.9989 0.07
				Cr 284.0021 0.05
	284.1938 Ⅱ	4.97	0.5	Mo 284.215 2~3
	285.1102 Ⅱ	5.56	3	Hf 285.1206 3~5
				Cr 285.1356 0.1
	285.624 Ⅱ	8.09	2	
	286.199 Ⅱ		1~2	Hf 286.1696 0.7~1
	286.8742 Ⅱ		7	Nb 286.8525 0.5
				Ta 286.8651 7~10
				W 286.8729 10
				Fe 286.8871 60

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ti	287.004		5~7	Zr 286.9811 7
				Hf 286.9825 ≥10
				V 286.9961 1
				Th 286.9927 ≥10
	287.7436 Ⅱ	5.42	0.5	Fe 287.7301 125
				Ta 287.7685 7
				V 287.7688 5
	288.4107 Ⅱ	5.42	0.1	Th 288.4295 3
	288.863		10	Nb 288.8833 1
	288.8932		5	
	290.194 Ⅱ		≥10	Ta 290.2046 7~10
	293.1261 Ⅱ	8.10	5	Nb 293.1469 3
				Zr 293.1060 ≥10
				Cr 293.0853 5
	293.617 Ⅱ	8.05	3	Tm 293.5997 0.5
				Th 293.6194 10
				Zr 293.6308 ≥10
	293.870 Ⅱ	8.06	3	
	294.1995	4.21	0.7	Nb 294.1543 0.1
				Ho 294.205 3
	294.547 Ⅱ	8.09	1	Er 294.5280 2
	294.8255 Ⅰ	4.22	3	
	295.2081 Ⅱ		≥10	V 295.2075 0.1
	295.476 Ⅱ	8.51	1	Co 295.474 1
				Fe 295.4655 70
	295.899 Ⅱ	8.48	1~2	
	300.0868 Ⅰ	4.18	7	Cr 300.089 0.01
	301.7187 Ⅱ	5.69	0.7	Tm 301.710 1
				Os 301.7247 2
	302.9730 Ⅱ	5.66	0.5	Dy 302.9826 3
	304.6685 Ⅱ	5.23	2	
	305.6740 Ⅱ	5.21	3	Ta 305.6615 5
				Lu 305.672 0.02
	305.8090 Ⅱ	5.23	0.07	Lu 305.790 0.01
	305.974 Ⅱ		5	
	306.3280 Ⅱ		7	
	306.6354 Ⅱ		0.01	Th 306.621 10
				V 306.6375 0.5
	307.1242 Ⅱ	5.21	0.7	Nb 307.156 3
				Dy 307.1920 1
	307.2107 Ⅱ	4.07	0.02	Zn 307.2062 10
				Co 307.2344 5
				Er 307.252 0.1
	307.2971 Ⅱ	4.04	0.005	Co 307.2664 3
				Hf 307.2877 5
				Dy 307.2971 10
	307.5224 Ⅱ	4.04	0.005	
	307.8645 Ⅱ	4.06	0.002	Tb 307.886 0.3
				Dy 307.835 5
				Fe 307.843 50
				Th 307.8832 1
	308.8025 Ⅱ	4.07	0.01	Ta 308.776 5~7
				Cr 308.7884 3~5
	308.9401 Ⅱ	5.90	0.07	Tb 308.958
	309.7186 Ⅱ	5.23	0.5	Ni 309.7122 1
				Nb 309.7122 2
				Tm 309.697 10
				Mo 309.7201 10
	310.3804 Ⅱ	5.88	0.05	Dy 310.3839 5
	310.5084 Ⅱ	5.21	0.1	Dy 310.5001 5
Ti	310.6234	5.23	0.02	
	311.0673	5.21	0.7	Mo 311.0644 3~5
				V 311.0706 0.01
	311.2050 Ⅱ	5.20	3~5	Er 311.203 0.7
				Mo 311.2124 7
				Th 311.235 1
	311.4092 Ⅰ		≥10	Pd 311.4040 1
				Ta 311.3903 ≥10
				Ni 311.4124 10
				Fe 311.4293 80
	311.7669 Ⅱ	5.20	0.1	Mo 311.7545 ≥10
	311.980 Ⅱ	5.20	0.05	
	312.1599 Ⅱ		7	Pd 312.1571 7~10
				Dy 312.189 7
	313.0800 Ⅱ	3.97	0.1	Ce 313.0344 1
				Ta 313.0578 7~10
				Nb 313.0786 0.01
				Er 313.107 5
	314.3756 Ⅱ	3.97	0.7	Fe 314.398 150
				Dy 314.3831 3~5
	314.8036 Ⅱ	3.94	0.1~0.2	Mo 314.8179 10
				Mn 314.8179 5~7
				Tb 314.821 3
	315.2251 Ⅱ	4.06	0.1	Nb 315.2159 1
	316.1205 Ⅱ	4.04	0.05	V 316.1371 10
	316.1774 Ⅱ	4.04		Fe 316.1949 150
	316.2570 Ⅱ	4.06	0.003	Hf 316.2611 2
				Fe 316.2800 100
				Dy 316.2824 1
				Th 316.2836 10
	316.8521 Ⅰ	4.07	0.003	
	319.0874 Ⅰ	4.97	0.002	Ho 319.097 1
				V 319.0678 0.03
				Sc 319.0005 0.5
				Nb 319.1096 0.5
	319.9915 Ⅰ	3.92	0.05	Fe 319.9994 200
				Hf 319.9994 5
	320.2538 Ⅱ	4.95	0.01	V 320.2381 3
	321.4750 Ⅱ	3.91	1	Mo 321.4442 5
				Dy 321.4636 5
				V 321.4750 2
				Tb 321.501 3~5
	321.7060	3.88	0.01	Mn 321.6946 ≥10
				Hf 321.6305 7
	321.8270 Ⅱ	5.42	0.07	
	322.2842 Ⅱ	3.86	0.01	Mo 322.290 5
	322.4241 Ⅱ	5.42	0.07	
	322.8605 Ⅱ	4.92	0.07	Zr 322.8810 7
	322.9193 Ⅱ	3.84	0.1	Ta 322.9236 10
	322.9423 Ⅰ	4.97	0.1	
	323.1315 Ⅱ		1	Tb 323.106 2
	323.2280 Ⅰ	4.95	0.07	Er 323.2026 1
				Os 323.2055 5
				V 323.1950 7
				Th 323.2123 2
				Sb 323.2499 1
	323.4516 Ⅱ	3.88	0.0005	Tb 323.450 5
				Ce 323.4495 7
				Fe 323.4611 125
	323.612 Ⅱ		0.05	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Ti	323.6573 II	3.86	0.0007	Fe 323.6223 200
				Nb 323.6430 0.3
				Zr 323.6578 10
				Dy 323.663 3～5
				Tm 323.6797 0.3
				Mn 323.6778 1～2
	323.9038 II	3.84	0.001	Fe 323.9436 300
	323.9664 II	4.91	0.07	Fe 323.9436 300
				Dy 323.959 7
				Sm 323.9638 ≥10
				V 323.9834 10
	324.1986 II	3.83	0.001	
	324.8602 I	4.87	0.003	Mn 324.8516 3
				Th 324.8892 10
	324.9370 II		3	La 324.935 0.01
				Tb 324.942
	325.1911	3.83	0.07	Pd 325.1640 2
				V 325.1870 1
				Dy 325.119 2
				Tb 325.134 0.5
	325.2914 II	3.84	0.005	Fe 325.2926 50
				Mn 325.2948 5
	325.4250 II	3.86	0.01	Nb 325.4067 0.5
				Co 325.4206 2
				Lu 325.431 0.01
				Fe 325.4363 150
	326.161 II	5.03	0.001～0.002	Tm 326.166 0.7
				Nb 326.1695 0.5
	326.3686 II	4.96	1	Nb 326.3366 0.5
				Ta 326.3404 5
	327.2080 II	5.01	0.2	Dy 327.2073 7
				Zr 327.2222 3～5
				Ce 327.2253 5
	327.5293 II	4.86	10	Er 327.5442 2
	327.6774 II	4.96	3～5	
	327.8290 II	5.01	0.07	Ho 327.515 0.5
	327.8922 I	4.68	0.05	Tb 327.904 1
				Er 327.932 0.3
				Mo 327.8881 0.7
				Lu 327.897 5
				Ho 327.826 1
				Zr 327.8265 0.07
				Fe 327.8734 60
	327.9995		0.7	Mo 327.944 10
				Hf 327.998 3
				Dy 328.010 1
				Er 328.022 1
				Tb 328.0216 0.3
				Fe 328.0216 150
	328.2329 II	5.00	0.1	Zn 328.2333 0.5
				V 328.2533 0.7
	328.7655 II	5.66	0.01	Tb 328.755 3
				Nd 328.741 10
				Dy 328.7953 7
	330.8806 II	3.88	1	Dy 330.889 0.5
	330.9501 I	4.80	1	Mo 330.942 ≥10
				Tm 330.980 0.5
	331.5324 I	4.96	1	
	331.8025 II	3.86	1	Hf 331.7988 3
				Ta 331.7928 7
Ti	332.1700 II	4.95	0.07	V 332.1538 5
				Th 332.1453 5
	332.2937 II	3.88	0.005	Fe 332.2068 100
	332.6765 II	3.84	0.07～0.1	Dy 332.642 3
				Co 332.6564 5～7
				Zr 332.6414 5
				Nb 332.6619 7
	332.9456 II	3.86	0.01	Tb 332.908 0.5
				Mo 332.9215 2
	333.2112 II		0.07	
	333.5195 II	3.84	0.05	Th 333.5062 ≥10
				Tb 333.542 3
	334.1875 II	3.70	0.0007	Dy 334.188 7
				Fe 334.1905 80
				Nb 334.1974 0.5
	334.6728 II	3.84	0.7	Mo 334.6403 1
				Cr 334.6742 0.5
				Nb 334.6750 5
	334.9035 II	4.31	0.001	Mo 334.8940 10
				Cr 334.9072 7
	334.9406 II	3.74	0.0005	Tb 334.942 0.1
	335.2071 II		5～7	Hf 335.2055 1
				Ho 335.208 2
				Sc 335.2048 3
	335.4635 II	3.71	0.1	Co 335.4377 0.5
	336.1213 II	3.71	<0.0005	Os 336.1149 1
				Tb 336.124 1
				Sc 336.1270 0.02
				Mo 336.1373 3
	336.6176 II		2	
	337.0439 II	3.67	7	Os 337.0588 10
				Nb 337.0158 5
				Mo 337.0520 ≥10
	337.1454 II	3.72	0.1	Tb 337.150 1
				Mo 337.1692 5
				Dy 337.176 3
	337.2800 II	3.68	0.0005	Er 337.2750 0.005
				Pt 337.2791 5
				Pd 337.3001 0.5
	337.4352 II		7	Ho 337.426 1
	337.7585 I		0.1	
	338.0280 II	3.71	0.01	Mo 338.0215 2
				Tb 338.015 5
				Ni 338.0575 0.5
	338.376 II	3.66	0.001	Fe 338.3698 70
				Fe 338.3980 100
	338.5946 I	3.70	1	
	338.7837 II	3.68	0.01	Zr 338.7872 3
				Nb 338.7926 10
				Co 338.8173 0.7
	338.8755		5	Dy 338.8863 3
	340.2422 II	4.86	3～5	Ho 340.217 3
				Cr 340.2399 5
				Tb 340.2422 1
				Sm 340.2463 7
				Fe 340.2262 150
				Zr 340.2523 7
	341.6957 II	4.86	10	Ta 341.7026 10
	344.4311 II	3.74	0.1	Nb 344.4279 5
				Tb 344.458 10

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%		
Ti	345.247	II	5.63	1	Th	345.2683	≥10
	345.6390	I	5.64	0.7	Dy	345.6566	0.7
	346.1500	I	3.71	0.1	Ni	346.1652	0.1~0.2
	347.7182	II	3.68	0.5	Dy	347.7074	0.7
					Ta	347.7220	≥10
	350.4892	I	5.42	0.01	Dy	350.4522	2
	351.0841	I	5.42	0.07	Bi	351.0853	10
	352.0253	I		1	Dy	351.160	5
	353.5412	I	5.56	0.7	Nb	353.5301	0.5
					Tm	353.5520	0.5
					Hf	353.5545	0.7
					Sc	353.5729	0.01
	357.3737	I		7	Dy	357.3838	1
					Er	357.3843	≥10
					Mo	357.3882	7
	359.6052	II	4.06	2	Bi	359.6110	≥10
					Ru	359.6179	5
					Rh	359.6194	1~2
	362.4825	II	4.64	1	Ni	362.4733	≥10
	363.5463	I	3.40	3			
	364.1331	II	4.64	1	Er	364.1269	2
	365.3496	I	3.44	0.7~1			
	366.2237	I	4.95	0.05	La	366.2073	1
					Cr	366.2161	0.7
					Nd	366.2263	5
	368.5195	II	3.96	0.0005	Ho	368.516	0.5
					Y	368.5903	0.5
Tl	229.816	II		3			
	245.172	II		7			
	246.895	I		10			
	253.07	I	14.30	0.5			
	258.014	I	4.80	3	Co	258.0326	5
	276.787	I	4.48	0.5			
	291.832	I	5.21	3	Tm	291.827	0.007
					Hf	291.8576	1
	309.166	I	13.39	1			
	351.924	I	4.49	0.1			
	352.943	I	4.48	3			
Tm	267.957	I		7~10			
	272.1192	I		7			
	279.7269	II		5	V	279.7018	7
					U	279.7145	7
	282.792	I		1~2	Mo	282.7743	5
					Ti	282.8150	0.7
	286.922	II		0.3	V	286.9134	0.7
					Fe	286.9308	70
	289.093	I		10			
	293.599	I		0.5	Ti	293.617	3
	295.126	II		1	Mn	295.1160	3~5
					Nb	295.0878	0.03
	296.587	II		1	Ta	296.5920	7~10
					Cr	296.6051	3
	298.652	II		0.7	Fe	298.6460	60
					Ta	298.6807	7
	301.465	II		2			
	301.529	II	4.14	0.5	Cr	301.5510	0.5
					Sc	301.5364	0.5
					Dy	301.5074	10
Tm	301.710	II		1	Dy	301.696	5
					Ti	301.7187	0.05
					Os	301.7247	2
	305.073	II		0.5	V	305.0730	7
					Ho	305.073	2
					Hf	305.0758	5~7
					Ni	305.0819	0.1
	305.606	II		0.7	V	305.6334	3~5
	306.642			10			
	307.3085	II		0.2	Ti	307.2971	0.005
					Er	307.252	0.1
	308.702	I		2	Tb	308.678	5
					Co	308.6777	5
					Ni	308.7077	2
	309.697	I		≥10	Ni	309.7118	1
					Nb	309.7122	2
					Ti	309.7186	0.5
					Mo	309.7101	0.5
	309.859	II	4.03	7	Mo	309.8465	10
	313.126	II	3.96	0.02~0.03	Be	313.1072	0.0002
					Os	313.1115	7
					Hg	313.1546	2
	313.389	I	3.96	0.1	Nd	313.3603	10
					Ni	313.4108	0.5
					Fe	313.4111	125
	314.489	II		1	Cr	314.5103	7~10
					Dy	314.5222	5
	314.616	I		2	V	314.6230	3
	315.007			7	Fe	315.0304	30
	315.1035	I		0.1~0.2	V	315.1322	3
					Mo	315.1630	5
	315.734	II	3.96	0.3	Mo	315.7328	5
					Fe	315.7040	100
	316.244			2			
	316.819			1	Ta	316.8183	0.7
	316.989			2			
	317.282	II	3.94	0.1	Mo	317.2742	3
					Ta	317.2874	10
	317.358	I		1	Ho	317.379	0.3
	323.544	I	3.86	0.5			
	323.6797	I	4.94	0.3	Mo	323.7075	7
					Dy	323.663	3~5
					Mn	323.6778	1~2
					Co	323.7028	0.1
	324.0229	II		0.7	Mn	324.0399	7
					Er	324.0484	1
					Mo	324.0713	1
	324.153	I	3.83	0.1~0.2			
	325.804	II	3.81	0.5	Ho	325.806	1
					V	325.7889	0.5
					Th	325.8118	2
					Mn	325.8413	10
					Zn	325.856	0.02
	326.166	II		0.7	Ta	326.1511	10
					Ti	326.161	0.001
					Nb	326.1695	0.5
	326.663	II	3.83	1	Dy	326.6207	1
					Tb	326.640	3
					Mo	326.6887	5
	326.741	II	4.90	0.7	Mo	326.7639	7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Tm				Sb 326.7502 0.7
				V 326.771 0.02
	326.900 Ⅱ		0.5	Os 326.9209 10
				Er 326.9411 0.5
	328.340 Ⅱ		0.5	Nb 328.3463 0.5
				Rh 328.3573 5
	328.561 Ⅱ		0.5	
	329.101 Ⅱ	3.76	0.1	Mo 329.0823 2
				Ho 329.096 2
				Fe 329.0989 80
				Dy 329.0117 7
	330.245 Ⅱ	3.79	0.3	Na 330.2323 >10
				Zn 330.2588 0.5
				Mo 330.2716 7
	330.980 Ⅱ		0.5	Mo 330.942 7
				Ti 330.9501 1
	336.261 Ⅱ	3.72	0.07	Dy 342.5015 3
				Fe 342.5015 40
				Ho 342.535 0.3
	342.997 Ⅰ		0.5	
	343.120 Ⅱ	4.70	1	Ta 343.0938 3~5
	344.151 Ⅱ	3.63	0.1	Pd 344.1396 0.5
				Dy 344.1453 7~10
	345.366 Ⅱ	3.61	0.05	Co 345.3505 0.002
	346.221 Ⅱ	3.58	0.007~0.01	Ho 346.196 0.5
				Rh 346.2040 1
	353.6570 Ⅱ	3.50	0.5	Fe 353.6557 200
	364.3652 Ⅱ			Mo 364.347 ≥10
	365.367 Ⅱ		1	Co 365.3505 0.003
	366.581 Ⅱ		0.7	
	366.808 Ⅱ		0.5	
	367.8864 Ⅱ	4.48	0.3	
	370.026 Ⅱ	3.37	0.7	
U	256.541 Ⅱ		2	
	263.553 Ⅱ		5	
	279.394 Ⅱ		2	
	279.7145		7	V 279.7018 7
	279.912		7	Fe 279.9286 100
	280.2157		7	Ta 280.2071 7
	288.826 Ⅱ		0.7~1	Mo 288.8153 1
				Fe 288.8093 80
				V 288.8246 1
	288.9121		2~3	Ti 288.8932 5
				Nb 288.8833 1
	290.6798 Ⅱ		1	Ti 290.668 7
	290.8275 Ⅱ		0.7~1	Nb 290.8243 0.5
				Ti 290.814 10
	311.935 Ⅱ	4.62	1	
	330.593 Ⅱ	3.75	2	
	343.7934		3~5	Zr 343.8230 0.03
	364.0948		0.3	Dy 364.080 1
V	250.6220 Ⅱ	6.04	7	Cu 250.6270 10
				Co 250.6462 0.2
	252.790 Ⅱ	6.48	5	Ti 252.7985 10
	252.8836 Ⅱ	6.46	5	Sb 252.8535 0.5
				Co 252.8967 0.1
	264.0855 Ⅱ	8.98	10	C 264.058
	264.2270		2	
V	264.4355	8.99	7	Ti 264.4264 10
				Mo 264.4353 0.7
				Ta 264.4598 5
	264.584 Ⅱ	6.48	5	
	266.3248 Ⅱ	9.05	5	Co 266.3529 0.3
				Pb 266.3166 0.5~1
	267.2004 Ⅱ	4.65	1	Cr 267.1809 0.5
				Nb 267.1931 1~2
				Mo 267.1834 10
	267.7802 Ⅱ	4.63	1	Mn 267.7846 ≥10
	267.8568 Ⅱ	4.65	3	Zr 267.8632 1~2
				Ru 267.8758 5
				Cr 267.8792 0.2
				Ta 267.8804 10
	267.9322 Ⅱ	4.65	1	Fe 267.9062 200
				Ni 267.9241 ≥10
	268.287 Ⅱ	4.63	3	
	268.7956 Ⅱ	4.65	0.1	Mo 268.7993 0.5
	268.8715 Ⅱ	4.65	5	
	268.9876 Ⅱ	4.61	3	
	269.0786 Ⅱ	4.62	3	Ni 269.0640 10
				Cr 269.100 0.1
	269.7745 Ⅰ	5.97	7	Cr 269.750 3
	269.8378		10	Er 269.8392
				Cr 269.8403 0.1
	270.0936 Ⅱ	4.63	0.7	Cr 270.0963 5
	270.2189 Ⅱ	4.61	2	Mo 270.1417 1
				Nb 270.2196 5
	270.6169 Ⅱ	4.60	1	
	271.5686 Ⅰ	4.60	1	Nb 271.5344 3
				Mn 272.8608 3~5
				Mo 272.8704 7
	276.0124 Ⅱ		5~7	
	276.0698 Ⅱ	6.87	3	Mo 276.0526 ≥10
	276.5668 Ⅱ	9.11	1~2	Ti 276.565 7
	276.6455 Ⅱ	6.16	5	Co 276.6221 7~10
				Cr 276.6540 0.007
				Rh 276.6540 ≥10
	277.1404 Ⅱ	9.08	≥10	Nb 277.165 5
				Th 277.6515 7
	277.4276 Ⅱ	6.02	5	Hf 277.4016 2
				Th 277.4072 7~10
				Fe 277.4691 50
				Ho 277.470 5
	277.577 Ⅱ	6.84	7	Ta 277.5877 10
	277.7733 Ⅱ	6.16	3	
	279.7018	6.46	7	U 279.7145 7
				Tm 279.7269 5
	279.8758 Ⅱ	6.48	3	
	279.945 Ⅱ	6.10	3	
	280.3467 Ⅱ	6.10	3	
	281.0269 Ⅱ	6.68	1	Ho 280.999 10
				Ti 281.0302 1
	281.7500	6.66	7~10	
	284.7572 Ⅱ	6.86	5	
	284.905 Ⅱ	6.02	7	Hf 284.9208 1~2
	285.0686		7	
	285.4336	6.86	1	
	285.5491 Ⅰ	4.34	7	
	286.4517		7	

续表

元素	分析线 λ/nm		激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%		
V	286.9134	Ⅱ	6.84	1			
	287.7688	Ⅱ	6.10	5	Ti	287.7436	0.5
					Ta	287.7686	7
					Sb	287.7915	1
					Cr	287.7978	3
	287.9163	Ⅱ	4.65	5	Mo	287.9047	0.5
					W	287.9107	5
	288.003	Ⅱ	4.65	1			
	288.2501	Ⅱ	4.63	0.5	Ta	288.2332	10
					Mo	288.2378	10
	288.4785	Ⅱ	4.62	0.2	Th	288.5045	2
	288.8246	Ⅱ	6.11	1	Mo	288.8153	1
					U	288.826	1
	288.9621	Ⅱ	4.61	0.7	Mn	288.958	0.1
					Hf	288.9619	7~10
	289.1642	Ⅱ	4.62	0.07	Mn	289.1321	5
					Yb	289.138	0.3
					Tb	289.141	5
					Ta	289.1843	10
	289.2659	Ⅱ	4.63	0.05	Mn	289.2392	1~2
					Fe	289.2483	40
					Mo	289.2812	2
	289.3320	Ⅱ	4.65	0.05			
	289.6211	Ⅱ		1			
	290.307	Ⅱ	4.59	0.7			
	290.6457	Ⅱ	4.60	0.07			
	290.746	Ⅱ	4.63	0.1			
	290.8817	Ⅱ	4.65	0.02	Os	290.9061	0.5
					Mo	290.9116	0.7
	291.001	Ⅱ	4.59	0.1			
	291.0389	Ⅱ	4.58	0.5	Nb	291.035	2
					Er	291.0357	0.05
					Nb	291.0587	0.3
					Lu	291.139	0.005
	291.9992	Ⅱ	4.60	2	Hf	291.9594	2
					Os	291.9794	7
					Th	291.9842	≥10
	292.0385	Ⅱ	4.58	0.3	Fe	292.0690	80
	292.4025	Ⅱ	4.63	0.01	Mo	292.3793	0.1
					Fe	292.3852	70
	292.4644	Ⅱ	4.61	0.01~0.02	Tb	292.416	1
					Mo	292.4318	2
	293.0806	Ⅱ	4.58	0.07	Mo	293.0532	0.3
					Cr	293.0853	5
	293.2323	Ⅱ	6.78	3	Th	293.252	1
					In	293.2624	1
					Mn	293.2662	10
					Ta	293.2695	≥10
					Cr	293.2705	5
	293.4401	Ⅱ	4.55	2	Mo	293.4299	0.5
					Cr	293.4493	5
					Er	293.4517	7
					Dy	293.4529	3
	294.1492	Ⅱ	4.55	0.07	Mo	294.1222	2
					Fe	294.1343	300
					Nb	294.1543	0.7
	294.4571	Ⅱ	4.58	0.07	Ga	294.4175	1
					Fe	294.4398	600
	295.0348	Ⅱ	4.52	1	Er	295.007	5~7
					Fe	295.0243	300
V					La	295.0492	2~3
					Hf	295.0679	5~7
	295.2075	Ⅱ	4.55	0.1	Ti	295.2081	≥10
					W	295.2288	5
					Lu	295.169	0.5
					Tu	295.1918	10
	295.7518	Ⅱ	4.52	0.7	Fe	295.7365	300
					Th	295.7598	3~5
					Mo	295.7749	5
	296.277	I	4.23	7			
	297.2254	Ⅱ	6.54	1~2	Fe	297.229	40
					Er	297.2279	7
					Nb	297.2572	0.2
	297.5652			5			
	297.620	Ⅱ	5.83	3			
	297.6520	I		0.1			
	298.5170	Ⅱ	7.95	7	Co	298.5325	10
	298.8021		5.83	1	Mo	298.7920	3~5
	300.1205	Ⅱ	5.83	0.1			
	300.3284	Ⅱ	5.81	1			
	300.8614	Ⅱ	6.67	1	In	300.831	1
					Ni	300.8629	0.2
	301.310	Ⅱ	5.78	2			
	301.4823	Ⅱ	5.79	0.07	Mo	301.478	3
					Cr	301.4915	0.03
	301.5983			2			
	301.6784	Ⅱ	5.81	1	Dy	301.696	5
					Er	301.6838	1~2
	303.3448	Ⅱ		0.07			
	303.3822	Ⅱ	5.90	0.07	Th	303.4069	5
					Sm	303.4121	0.05
					Cr	303.4191	5
	304.2264	Ⅱ	6.09	5	Fe	304.2022	100
					Ta	304.2062	0.7~1
					Pt	304.2637	2
	304.3124	I	4.09	7	Dy	304.3144	5
	304.8215	Ⅱ	6.58	0.07	Nb	304.8204	5
					Mo	304.805	7
	304.8892	Ⅱ	6.10	5	Mn	304.8864	≥10
	305.0730	Ⅱ	6.34	7	Tm	305.073	0.5
					Ho	305.073	3
					Ni	305.0819	0.1
	305.3387	Ⅱ	5.86	0.5	Nb	305.3637	5
					Cr	305.3880	0.2
					Ho	305.399	2
	305.6334	I	4.07	5	Sc	305.6306	0.02
					Ta	305.6615	5
					Ce	305.6777	7~10
	306.0460	I	4.09	2	Dy	306.0635	1~3
					Mo	306.0777	7
	306.3247	Ⅱ	6.56	0.07~0.1	Ce	306.3010	1
					Nb	306.3130	10
					Th	306.3132	3
					W	306.341	7
					Cu	306.3415	10
	306.6375	I	4.11	0.5	Th	306.622	10
					Er	306.6225	5
					Ti	306.6354	0.01
	307.3823	I	4.05	5	Dy	307.3542	3
					Tm	307.385	0.2

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
V	308.2111 I	4.09	5	
	308.2523		7	Al 308.2155 0.003
				Mo 308.2220 5
				Ta 308.236 10
				Tb 308.236 0.5
				Mn 308.2800 0.7~1
				Co 308.2844 7
	308.3214 Ⅱ	6.54	7	Th 308.3347 5
	309.3108 Ⅱ	4.40	0.0005~0.001	Tm 309.312 0.01
	309.4199 Ⅱ	6.04	0.05	Nb 309.4183 0.007
	310.0935 Ⅱ	6.02	0.5	
	310.2299 Ⅱ	4.36	0.003~0.005	Dy 310.219 3
	310.4913		≥10	
	310.8701 Ⅱ	6.02	7	Os 310.8981 7
				Cu 310.8605 7
	310.9372 Ⅱ	7.11	7	Hf 310.9117 1
				Sc 310.9341 0.3
				Os 310.9381 7~10
	311.0706 Ⅱ	4.33	0.01	Mo 311.0644 5
				Ti 311.0673 0.7
				Dy 311.0757 7
	311.3567 Ⅱ	6.88	1	Er 311.3536 0.5
				Dy 311.3536 5
				Tb 311.362 5
	311.6781		10	Fe 311.649 150
				As 311.663 10
	311.8383 Ⅱ	6.88	0.03	Th 311.8328 10
				Os 311.8328 10
				Lu 311.843 7~10
				Ho 311.851 0.5
				Cr 311.8652 0.05
	312.0734 Ⅱ	6.53	1	Fe 312.0874 50
	312.1145 Ⅱ	4.36	0.1	Ce 312.1085 10
				Co 312.1415 5
	312.2895 Ⅱ	6.87	0.5	Er 312.265 0.03
				Au 312.2781 0.06~0.1
				Sc 312.2954 1
				Th 312.2962 2
	312.5284 Ⅱ	4.29	0.01	Cr 312.4978 0.01
	312.6215 Ⅱ	4.33	0.07~0.1	Fe 312.6176
	313.0267 Ⅱ	4.31	0.05	Ho 313.038 1
				Ce 313.0394 1
				Be 313.0416 0.0001
				W 313.0456 7~10
				Ta 313.0578 7
				Ir 313.0578 0.5
	313.3328 Ⅱ	4.29	0.1	Zr 313.3457 1
	313.4931 Ⅱ	6.48	0.1	Hf 313.4718 0.1
				Nd 313.4897 7
	313.6514 Ⅱ	6.47	0.1	Mo 313.6412 5
				Cr 313.6680 0.1
				Co 313.6726 ≥10
	313.9745 Ⅱ	6.46	0.5	Tb 313.964 3
				Hf 313.9653 5~7
				Sc 313.9729 3
				Mo 313.9871 ≥10
	314.1485 Ⅱ	6.55	5	Ta 314.1380 7~10
				Mo 314.1730 3~5
				Er 314.180 0.7
	314.2475 Ⅱ	6.16	0.1	Dy 314.2303 7
V				Fe 314.2453 100
				Mo 314.2750 7
				La 314.2762 3
	314.5342 Ⅱ		3~5	Co 314.5021 ≥10
				Tb 314.522 3~5
				Dy 314.5222 3~5
				Mo 314.5286 ≥10
				Hf 314.5319 5
				Nb 314.540 0.1
	314.6230 Ⅱ	6.50	3	Dy 314.6165 7
	315.1322 Ⅱ	6.43	3	Tm 315.1035 0.1~0.2
				Mo 315.1630 3
	318.2591		10	Ti 318.252 10
	318.3406 I	3.91	0.1	Cr 318.3325 3~5
	318.3982 I	3.90	0.07	Ho 318.385 0.7
				Tb 318.388 5
				Nb 318.4223 1
	318.5396 I	3.96	0.1	
	318.7708 Ⅱ	4.96	0.05	Mo 318.7592 2~3
				Dy 318.7676 7~10
				Ho 318.7743 1
				Er 318.7785 3
	318.8513 Ⅱ	4.98	0.05	Mo 318.8403 10
				Fe 318.8571 100
				Fe 318.8821 100
	319.0678 Ⅱ	5.01	0.03	Ho 319.097 1
	319.4915 I		7	
	319.8011 I	3.90	5	Tb 319.801 0.5
				Lu 319.812 0.5
				Ho 319.883 2
	320.2381 I	3.91	3	Ti 320.2538 0.01
	320.5582 I		3	
	320.7410 I	3.94	5	
	320.8352 Ⅱ	4.96	3	Nb 320.8158 5
				Fe 320.8475 80
				Dy 320.871 5~7
				Mo 320.8832 0.5
	321.7112 Ⅱ	5.90	0.1	
	323.1950 Ⅱ	6.09	7	Zr 323.1693 1~2
				Er 323.2026 1
				Os 323.2055 5
				Th 323.2123 2
				Ti 323.2280 0.07
	323.3768		3	
	323.7874 Ⅱ	6.84	0.5	Er 323.800 0.7
				Nb 323.8024 5
				Tm 323.804 0.5
				Th 323.8118 2
	323.9834		10	Fe 323.9436 300
				Hf 323.9438 5
				Dy 323.959 5
				Sm 323.9638 ≥10
				Ti 323.966 0.07
	325.078 Ⅱ	6.71	0.7	Dy 325.119 2
				Dy 325.1206 2
	325.1870 Ⅱ	6.34	1	Pd 325.1640 2
				Mo 325.1649 5
				Ti 325.1911 0.07
	325.477 Ⅱ	5.83	0.7	Mo 325.4680 0.5
				Nb 325.4880 0.7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
V	326.771 Ⅱ	4.86	0.02	Tm 326.741 0.7～1
				Sb 326.7502 1
				Mo 326.7539 7
				Os 326.7945 2
	327.1125 Ⅱ	4.88	0.05	Fe 327.1002
	327.612 Ⅱ	4.91	0.01	Mo 327.6366 3
	327.9845 Ⅱ		0.1	
	328.2533 Ⅱ	6.14	1	Dy 328.279 1
	328.9389 Ⅱ	4.86	3	Mo 328.9015 5
				Dy 328.934 5
				Yb 328.937 0.005
				Ho 328.938 10
	330.4470 Ⅱ	6.30	≥10	
	332.1538 Ⅱ	6.50	5	Tb 332.1:5 0.7
				Be 332.134 0.01
				Ti 332.1700 0.07
	333.7846 Ⅱ	6.84	7	
	345.7152 Ⅱ	6.18	5	
	348.5867 I		5	
	349.7030 I	6.14	3	
	350.4439 I	4.63	2	Mo 350.4413 5
				Dy 350.4522 2
	351.730 Ⅱ	4.65	0.1	
	352.4715 Ⅱ		5	Ni 352.4541 0.07
				Dy 352.461 7
				Mo 352.4646 3
	353.077 Ⅱ	4.45	0.5	
	354.519 Ⅱ	4.59	0.1	Ho 354.597 5
	355.6801 Ⅱ		0.05	Zr 355.6597 0.1
				Ho 355.676 0.5
	356.618 I	4.55	5	
	358.976 Ⅱ	4.52	0.07	
	359.2024 Ⅱ	4.55	0.1	
	359.3334 Ⅱ	4.58	0.5	
	366.941 I	5.90	1	
	367.1205 I	4.73	5	
	368.3126 I	3.63	1	Pb 368.3471 0.01
	368.8069 I	3.62	0.1	Gd 368.7759 7
				Nb 368.7971 0.2
	369.0281 I	3.62	0.5	Pd 369.0341 0.3～0.5
	369.223 I	3.63	0.3	Mo 369.2645 0.7
W	239.037 Ⅱ	6.10	10	
	239.293 I	6.82	10	
	239.7091 Ⅱ	5.56	2	Er 239.725 5～7
				Co 239.7388 0.5
	247.780 Ⅱ	5.76	7	
	248.0949 I	5.20	7	
	248.8118 Ⅱ		5	
	248.8771 Ⅱ	5.90	5	Pt 248.888 2
	249.9216		7	
	255.5205		10	
	256.3162 Ⅱ	6.99	10	
	257.1445 Ⅱ	5.21	1	Zr 257.1391 0.7
	257.2235 Ⅱ		5	
	257.9258 I		3～5	
	258.0332		5	
	258.1200 Ⅱ	5.56	7	
	258.9167 Ⅱ	5.55	5	Mn 258.8957 5
	260.3021 Ⅱ	6.81	5	
W	265.3567 Ⅱ	5.25	10	Mo 265.3349 0.7
				Cr 265.3586 0.7
				Co 265.3703 3
				Yb 265.375 3
	265.6539 I	5.02	10	
	265.6539 I	5.43	10	Ni 265.6907 10
	265.8037 Ⅱ	4.85	2	Lu 265.780 0.3
				Hf 265.7837 7
				Nb 265.8027 5
	266.4318 Ⅱ	6.81	3～5	
	267.1466 I	5.23	7～10	Nb 267.1256 1～2
	267.2669		10	Mn 267.2586 2
				Cr 267.283 0.5
				Mo 267.2843 0.5
	267.3591 Ⅱ		10	Mo 267.3273 0.5
				Mn 267.3567 5
	268.1413 I	4.98	5	
	269.4380		7	V 269.4468 3
	269.7714 Ⅱ	4.78	2	V 269.7745 7
	270.0009 I	6.08	10	
	270.2111 Ⅱ	6.25	1～2	Mo 270.1873 5
	271.5338 Ⅱ	6.62	7	
	271.7699 Ⅱ		5	
	272.4627 I	5.32	2	Mn 272.4449 1
	276.4266 Ⅱ	4.48	1	Cr 276.4350 5～7
	277.4480 I	5.23	7	V 277.4276 5
				Mo 277.4392 5～7
	277.6502 Ⅱ	6.30	7	
	280.5627		10	
	281.8060 I	5.16	7	
	282.2572 Ⅱ	6.05	7	Cr 282.2371 0.07
				Ru 282.2552 ≥10
				Hf 282.2677 3
	285.6027		5	Mo 285.5995 10
				Ti 285.624 10
	286.6061 I	4.73	5	
	287.9107			Mo 287.9047 1
				V 287.9163 5
				Er 287.9913 7
	289.6008		7	
	289.6446 I	4.63	1	Th 289.671 1
	293.4991 I	4.42	5	Cr 293.5139 1
	294.6981 I		0.7	Zr 294.6972 ≥10
	295.2288 Ⅱ	5.51	5	V 295.2075 0.1
				Ti 295.2081 ≥10
	297.9858		3～5	Ho 297.963 0.5
				Sc 297.9683 5
				Cr 297.9741 0.1
	299.3611		2	Bi 299.3342 5
				Mo 299.3515 5
				Th 299.3803 1
	301.7443		7	
	302.4920 Ⅱ	5.50	5～7	Hf 302.4603 7
				Nb 302.4738 0.5
	303.666 Ⅱ	5.74	10	
	304.986 I		7	
	305.1291 Ⅱ	5.72	3	Th 305.1796 ≥10
	306.397 Ⅱ	6.10	≥10	
	307.7519		2	Fe 307.7168 300
				Ta 307.7245 5～7

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
W				Lu 307.760 0.005
				Mo 307.7661 1
				Os 307.7720 5
	309.3512		7	Fe 309.3357 40
				Cr 309.3488 3
	310.2221		7	
	311.1123 Ⅰ	5.80	7	Os 311.009 ≥10
				Hf 311.0874 5
	311.8786		10	V 311.8383 0.02
				Lu 311.8435 7～10
				Ho 311.851 0.5
				Cr 311.8652 0.05
				Er 311.8833 1
	314.985 Ⅱ	5.56	7	Cr 314.9822 5～7
				Ho 314.992 3
	316.3418 Ⅰ	5.78	7	
	318.9236 Ⅱ		7～10	Nb 318.9282 0.7
				Os 318.9459 1
	320.7252 Ⅰ		7	
	321.1382 Ⅰ	4.10	3～5	Fe 321.1487 40
	321.526 Ⅰ	4.63	1	Dy 321.5189 1
				Mo 321.5189 5～7
				Ho 321.557 3
	330.0820 Ⅰ	4.36	5	
	331.1382 Ⅰ	6.12	7	
	332.6190 Ⅰ	4.50	7	Zr 332.6414 5
				Dy 332.642 3
				Co 332.6564 5～7
	333.1672 Ⅰ	4.08	7	Ta 333.1487 10
				Fe 333.1612 70
	337.6144 Ⅱ	5.55	7	V 337.6057 7
				La 337.6329 0.5～0.7
	349.5246 Ⅰ	5.99	7	
	357.2476 Ⅱ	4.78	3	Zr 357.2473 0.05
				Sc 357.2523 0.003
				Pb 357.2734 0.1
	357.5226 Ⅰ		7	
	359.242 Ⅱ	4.85	7	
	361.3790 Ⅱ	5.24	5	Tb 361.368 2
				Sc 361.3836 0.001
	361.7521 Ⅰ	3.80	1	
	364.185 Ⅱ	4.48	7～10	
Y	224.306 Ⅱ	5.52	0.2	
	281.703 Ⅱ	5.32	0.7	Cr 281.6842 5
				Ta 281.7101 5～7
	294.595 Ⅱ	5.13	0.5	Mo 294.5009
				Nb 294.5883 1
	319.562 Ⅱ	3.99	0.07	
	320.0270 Ⅱ		0.07～0.1	
	320.3323 Ⅱ	3.98	0.07	Nb 320.3353 0.5
	321.228 Ⅱ		0.7	
	321.6682 Ⅱ	3.99	0.03～0.05	Cr 321.656 1
				Th 321.6625 0.7
				Dy 321.663 0.5
				Ho 321.667 2
				Ta 321.6923 5
	324.228 Ⅱ	4.01	0.07	
	327.843		10	
	328.091 Ⅱ		0.7	
Y	329.060		1～2	V 329.0238 10
				Th 329.059 0.5～0.7
				Nd 329.0643
	332.7875 Ⅱ	4.14	0.03	
	349.6080 Ⅱ	3.54	0.3	Zr 349.6210 7～10
	354.9011 Ⅱ	3.62	0.07	Dy 354.9255 1
	360.0734 Ⅱ	3.62	0.01	Dy 360.034 1
				Tb 360.044 0.7～1
				Er 360.0742 3
	360.1921 Ⅱ	3.54	0.07	Tb 360.175 1
				Co 360.2084 1
	361.105 Ⅱ	3.56	0.1	
	362.094 Ⅰ		1	
	362.8706 Ⅱ	3.54	0.2	La 362.8822 0.7
	363.3123 Ⅱ	3.41	0.05	Cr 363.2839 ≥10
				Dy 363.300 1
				Au 363.324 7
	366.4614 Ⅱ	3.56	0.05	Er 366.4440 7
				Gd 366.4621 7
	368.4903 Ⅱ		0.5	Ho 368.516 0.5
				Ti 368.5192 0.0005
	371.029 Ⅱ	3.52	0.01	
Yb	246.140		7	
	265.375 Ⅱ	7.33	1～2	Mo 265.3369 0.7
				W 265.3567 10
				Cr 265.3586 0.3
				Co 265.3703 3
	265.611 Ⅱ		10	
	275.048 Ⅱ	7.16	0.7	Y 275.040 0.5
	281.875		1	Zr 281.874 0.2
	289.138 Ⅱ	4.29	0.5	Th 289.1275 10
				Mo 289.1275 5
				Ti 289.1301 ≥10
				Mn 289.1321 5
				Ho 289.139 1～2
				Tb 289.141 5
				V 289.1642 0.07
	300.5765 Ⅰ	8.05	0.5～0.7	Hf 300.5557 7
				Nb 300.5767 5
	319.2878 Ⅱ		1	
	328.937 Ⅱ	3.77	0.007	Dy 328.934 5
				Ho 328.938 10
				V 328.9389 3
	337.548 Ⅱ	6.99	0.7	
	343.884 Ⅱ	7.57	2～3	Dy 343.8952 0.02
				Nd 343.897 5
	345.407 Ⅱ	6.90	0.7	Nb 345.397 2～3
				Tb 345.406 0.3
				Er 345.4318 3
	346.437 Ⅰ	3.58	0.5	Sr 346.4457 0.02
				Re 346.4722 1
	347.884 Ⅱ	7.31	0.3	Nb 347.8778 2
				Rh 347.8906 5
				Hf 347.8990 3
	356.0727 Ⅱ	7.80	0.5	Nd 356.0729 1
				Os 356.0798 5
				Ce 356.0798 5
				Co 356.089 0.5
	361.131 Ⅱ	8.08	0.5	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Yb	361.982 II	6.99	0.3	Nb 361.973 0.1
	367.507 II	7.16	0.7	
	369.4203 II	3.35	0.005	Er 369.4193 0.5
Zn	250.2001	10.97	7	
	275.645 I		10	
	277.098 I	5.50	10	
	280.0869 I	8.50	7	Ti 280.061 7
				Cr 280.0771 0.1
				Mn 280.1064 0.7
				Sc 280.132 0.3
	301.835 I	8.11	10	
	307.590 I	4.03	5	
	328.2333 I	7.78	0.7	Ti 328.2329 0.07
				V 328.2533 3
	330.2588 I	7.78	0.1	Tm 330.245 0.3
	330.2941 I	7.78	0.05	Mo 330.2716 1～2
				La 330.311 0.07～0.1
	334.5020 I	7.78	0.05	Zr 334.4786 7
				W 334.4904 5
	334.5572 I	7.78	0.7	Er 334.546 0.5
Zr	244.1991 II		10	
	245.654 I		7	
	256.7638 II	4.83	7	
	256.8873 II	4.99	3	
	257.1391 II	4.91	0.7	Lu 257.123 3～5
				Sm 257.1592 0.3～0.5
				Hf 257.1670 0.5
	262.0576 II	7.12	5～7	
	263.909 II		10	
	264.3395 II		5～7	
	265.647 II	7.00	7	
	267.8632 II	4.79	1～2	V 267.8568 3
				Ru 267.8758 5
				Cr 267.8792 0.2
	268.2160 II	6.95	5～7	
	268.628 II	6.89	7	Th 268.616 7
				Nb 268.6391 1
	269.050 II	6.88	7	V 269.0245 1
	270.0131 II	4.68	5	
	272.2610 II	4.72	3	Cr 272.2749 2
	272.6493 II	4.64	5	Cr 272.6511 5
	273.4855 II	4.57	3	
	275.2206 II	4.54	3～5	Th 275.2172 5
				Ta 275.2489 5
	275.8813 II		7	Mo 275.8506 7～10
	284.4579 II	5.36	5	Nb 284.4435 10
				Ta 284.4463 3
	286.9811 II		7	Hf 286.9825 ≥10
				V 286.9961 5
				Ti 287.004 5
	291.5991 II		5	
	292.698 II		3	
	295.5783 II		5～7	Lu 295.578 7
	296.2683 II		7～10	V 296.2772 7
	302.8040 II		5	Mo 302.7771 7
				Pd 302.7910 2～3
				Cr 302.8125 5
	303.6393 II		5	
Zr	305.4835 II		2	
	306.5211 II		10	
	309.5071 II		7～10	
	310.6576 II	4.99	4	Ti 310.6234 1
	311.0878 II		5	
	312.5193 II		7	
	312.5918 II		5	
	312.9176 II		5	
	312.9761 II		3	
	313.3475 II	4.90	1	V 313.3328 0.1
				Nd 313.3603 7
	313.8678 II	4.05	0.7	
	315.567 II		7	Mo 315.5644 1
	315.6996 II		5	
	316.4310 I		5	
	316.5446 II		1	
	316.5974 II		0.05	
	318.2858 II	4.45	0.07	
	321.4189 II	3.94	1	Mo 321.4442 5
	322.8810 II		7	Ti 322.8605 0.07
	323.1693 II		1～2	V 323.1950 7
	324.1046 II	3.86	5	Dy 324.0878 5
	325.0392 I		7	
	327.2222 II		3～5	Ti 327.2080 0.2
				Co 327.2253 3～5
	327.3047 I	3.95	0.05	Er 327.308 2
	327.9265 I	3.88	0.07	Ti 327.8922 0.07
				Ho 327.926 1
				Er 327.932 0.3
				Mo 327.944 10
	328.2834 II		1	Dy 328.279 1
				Fe 328.2892 80
				Ho 328.307 3
	328.4713 II	3.78	0.7～1	Fe 328.4588 125
				Mo 328.4622 7
	330.5152 II		5	Ho 330.516 3
	330.6278 I	3.79	1	Dy 330.619 5
				Fe 330.6354 150
				Sm 330.6372 7
	332.2988 II		7	Fe 332.2068 100
				Ti 332.2937 0.005
	332.6414 II	5.26	5	W 332.6190 5
				Dy 332.642 3
				Nb 332.6619 7
				Ti 332.6765 0.1
	333.3556 I		5	
	333.4251 II		5	
	334.0555 I		3	Ho 334.046 7
				Er 334.048 2
				Mo 334.0508 ≥10
	335.6091 II	3.79	2～3	Dy 335.6220 5
	335.726 II	3.69	5	
	335.9955 II		7	
	337.4726 II		3	Nb 337.4925 5
	338.7872 II	4.63	3	Ti 338.7836 0.01
				Nb 338.7928 10
				Co 338.8173 0.7
	338.8229 II	3.65	1	Co 338.8173 0.7
	339.1975 II	3.82	0.02	Mo 339.1851 5
				Er 339.1989 0.03

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	检出限 w/%	干扰元素及干扰限 w/%
Zr	339.6658 Ⅱ		10	Eu 339.658 5
				Rh 339.685 0.7
	339.9349 Ⅰ	3.97	5	Fe 339.9336 200
	340.1796 Ⅰ		≥10	Fe 340.1521 90
				Er 340.1830 0.7
	340.2523 Ⅱ		7	Tb 340.233 1
				Cr 340.2399 5
				Ti 340.2422 5
				Sm 340.2701 5
	340.3684 Ⅱ		7~10	Cr 340.3322 0.1
				Dy 340.345 7
				Cd 340.3653 1
	340.4832 Ⅱ		3~5	Pd 340.4580 0.02
				Tb 340.471 5
				Co 340.5120 0.03
				Cr 340.5120 0.03
	341.0284 Ⅰ	4.05	1	
	341.340 Ⅰ		10	Ho 341.025 0.5
	341.4661 Ⅱ		5	
	343.0532 Ⅱ	4.08	0.7~1	
	343.8230 Ⅱ	3.69	0.03	U 343.7934 2~5
				Hf 343.8235 5~7
				Er 343.8473 0.7
	344.737 Ⅰ	3.59	10	
	346.3017 Ⅰ	5.06	0.7	Mo 346.3032 7
	347.9392 Ⅰ	4.28	0.5	Hf 347.9285 1
				Tb 347.929 3
				Nb 347.9564 0.7~1
	348.1146 Ⅰ	4.36	0.3	Pd 348.1152 0.1
	348.3539 Ⅱ		5	Co 348.3410 1~2
	349.6210 Ⅱ	3.58	0.03~0.05	Y 349.6080 0.3
	350.5485 Ⅱ	5.07	0.5	Ho 350.695 10
				Dy 350.5457 2
	350.9323 Ⅰ	3.60	≥10	Tb 350.917 0.01
				Ho 350.935 3~5
	354.2623 Ⅱ	5.26	0.7	
	355.1951 Ⅰ		0.7	
	355.6597 Ⅰ	3.95	0.1	Ho 355.678 0.5
				V 355.6801 0.05
				Fe 355.6883 150
	357.2473 Ⅱ	3.46	0.05	Sc 357.2523 0.002
				Pb 357.2734 0.1
	357.6854 Ⅰ	3.88	0.5	Dy 357.6873 0.5
	361.1893 Ⅱ	5.17	3	W 361.1855 7
	361.3100 Ⅱ		3	Fe 361.220 50
				Ho 361.335 3
	361.4774 Ⅱ	3.79	1	Mo 361.4686 3
				Dy 361.4707 5
	367.1269 Ⅱ		3	Gd 367.1216 7
	367.4718 Ⅱ	3.69	1	Ho 367.477 1
	367.8905 Ⅱ		7	
	369.8167 Ⅱ	4.36	0.5	

表 2-18 元素分析线、灵敏度与干扰谱线表[4]

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/%		干扰元素检出限量 w/%	备注
			垂直法	撒料法		
Ag	243.779 Ⅱ	9.93	~1	0.05~0.1	Mo 243.774 >1	
					Ni 243.789 ≈0.3	
	328.068 Ⅰ	3.78	0.0001	0.00003	Fe 328.026 >3	
					Th 328.037 ≈0.5	
					Ce 328.048 0.3	
					Cu 328.068 >1	
					Zr 328.075 3	
					Mn 328.076 ≥0.3	
					Ta 328.087 10	
					Y 328.091 ≈0.5	
					Mo 328.107 ≈0.1	
					V 328.112 1	
	338.289 Ⅰ	3.66	0.0001	0.00003	Cr 338.268 0.1	
					Th 338.312 I	
					Sb 338.314 >1	
					Ce 338.368 >1	
Al	237.841 Ⅰ	5.23	<1	1	Co 237.862 1	铝含量>3%时用此线
	265.249 Ⅰ	4.66	0.03	0.01~0.03	Mn 265.249	黑度变化明显，Al含量0.1%~3%时用此线
					Sb 265.260 0.1	
					W 265.261 10	
	266.039 Ⅰ	4.66	0.03	0.01~0.03		适于0.1%~3%铝含量测定
	305.008 Ⅰ	7.65	3	1~3	Th 304.987 1	
					W 305.000	
	308.215 Ⅰ	4.02	0.001	0.0005	Mo 308.195 大量	适于低含量铝的测定
					Mn 308.205 1	
					V 308.211 0.3	
					Th 308.217 大量	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/%		干扰元素检出限量 w/%	备注
			垂直法	撒料法		
Al	309.271 I	4.02	0.003	0.001	Mo 329.270	适于低含量铝的测定
					V 329.272	
					Nb 329.288 大量	
					Mg 329.299 0.3	
					Th 329.305 大量	
	394.409 I	3.14	≤0.001		Nb 394.367 高含量	由于氰带干扰，仅用于定性
					Ni 394.412 高含量	
	396.153 I	3.14	≤0.001		Zr 396.16 >0.01	由于氰带干扰，仅用于定性
					Ni 396.212 1	
As	234.984 I	6.59	0.01	0.003	U 234.960 10	As 含量 0.01%～0.3%时用此线
					W 234.982 >3	
					Mo 234.989 10	
					In 234.99 高含量	
					Ti 234.994 0.3	
	238.118 I	6.56	0.5～1	0.1	Hf 238.100 ≈3	
					Re 238.114 1	
	286.044 I	6.59	0.05～0.1	0.01	Ti 286.027 1	As 0.1%用此线
					U 286.046 0.3	
	299.099 I	6.37	3～5	1	V 299.095 0.3	
					Ti 299.099 3	
					Ni 299.109 1	
Au	235.265 II	6.40	≥1		Mo 235.261 0.1	
					Co 235.285 0.3	
	242.795 I	5.10	0.001	0.0003	Nb 242.754 >10	SiO 分子光谱
					Sr 242.81 1	
					Pt 242.820 ≈1	
					V 242.828 ≈1	
	267.595 I	4.63	0.001	0.0003	Mn 267.551 10	
					Cr 267.568 3	
					V 267.576 1	
					267.597 1	
					W 267.587 ≈1	
					U 267.588 >1	
					Nb 267.594 0.3	
					Co 267.598 >0.3	
					Fe 267.611 10	
	270.089 I	5.72	0.3		Cr 270.059 1～3	
					V 270.094 0.03	
					Mo 270.103 3	
					Eu 270.112 0.1	
	274.826 II	5.64	0.01	0.005	Cr 274.829 0.1	
					U 274.845 0.3	
	312.282 I	5.10	0.02	0.005	Mo 312.276 0.1	
					V 312.289 0.1～0.03	
B	249.678 I	4.96	0.001	0.0005	Fe 249.655 1	
					Hf 249.698 0.3～1	
	249.773 I	4.96	0.001	0.0005	Sn 249.772 >0.1	
					Fe 249.782 >10	
					Mo 249.786 >1	
Ba	233.527 II	6.00	0.01	0.01		Ba 含量为 0.01%～0.5%适用此线
	234.758 II	5.98	0.3	0.05	Co 234.739 0.3～1	Ba 含量为 0.3%～5%适用此线
					Ni 234.752 0.1	
	263.478 II	7.39	≈1		Dy 263.481 0.3	Ba>5%用此线
	277.135 II	7.15	1～3		Mn 277.143 0.3～1	SiO 分子光谱
	307.158 I	4.04	0.1	0.03	Cr 307.130 1	
					Mo 307.144 1	
					Nb 307.156 0.1	
	455.404 II	2.72	<0.001		Ti 455.342 3	
					Cr 455.395 1	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Ba	493.409 II	2.51	0.001		Zr 455.397 2 Zr 493.364 5 La 493.482 1 V 5	
Be	234.861 I	5.28	0.0001	0.0005	Ni 234.874 3 Cu 234.882 ≈1	适于微量Be测定 SiO分子光谱
	235.069 I	7.99	0.3	0.5		Be含量>0.5%用此线
	249.458 I	7.68	0.01	0.03	Mn 249.440 3~10	Be含量为0.01%~0.x%用此线
	249.473 I	7.68	0.01	0.03	Ru 249.448 1~3	
	265.047 I	7.40	0.001	0.005	Co 265.027 0.3 Zr 265.038 0.3 Pb 265.04 3~10 Th 265.058 0.3~1	Be含量>0.001%用此线
	298.609 I	10.61	1	1	Mo 298.584 3 Cr 298.585 0.03 298.599 0.01 Mn 298.600 1	
	313.007 II	3.95	0.0001	0.0005	V 313.026 ≥0.01 Nb 313.079 >0.01	
	313.042 II	3.95	0.0001	0.0005	Ti 313.080 >0.1 Cr 313.121 0.3	
Bi	240.088 I	7.07	0.3~1	1	Co 240.056 3 240.110 1~3 Ta 240.063 0.3 Hf 240.078 1	
	289.798 I	5.69	0.01	0.003	Mo 289.763 ≈1 Y 289.767 ≈1 Cr 289.770 3 La 289.776 10~15 Nb 289.781 >0.1 Mn 289.799 >0.5 Be 289.827 5	
	299.334 I	5.55	0.03~0.1		Ru 299.327 0.3 Mo 299.351 0.3 W 299.361 0.3	
	306.772 I	4.04	0.001	0.0005	Fe 306.724 1 Mo 306.764 3 Th 306.773 0.1 Sn 306.776 10	Bi含量在0.002%~0.01%时用此线
Ca	239.856 I	5.18	1~3	1	V 239.827 10	
	272.165 I	4.55	5	5	Th 272.169 0.3 Ag 272.182 0.3	
	299.731 I	6.02	~0.5		Cu 299.736 3 Mo 299.741 3 Ru 299.742 0.3	
	315.887 II	7.05	0.03~0.1	0.05	Th 315.861 1 Co 315.877 0.1	Ca含量在0.03%~0.5%用此线
	317.933 II	7.05	0.03	0.03	Fe 317.897 Cr 317.928 0.3 Rh 317.972 1	
	393.367 II	3.15	≤0.001		Fe 393.361	
	396.847 II	3.12	≤0.001		Cr 396.901	
	422.673 I	2.93	0.001		Fe 422.643 Ce 422.673	
Cd	228.802 I	5.41	0.001		As 228.812 >0.01	严重自吸
	283.691 I	8.10	0.3~1	0.1~0.3	V 283.669 1 Co 283.715 0.3	
	286.82 I	8.26	1~3			

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Cd	313.317 I	7.76	0.3	0.1	Ru 313.288 0.3	
					V 313.333 0.01	
	326.106 I	3.80	0.01	0.003	Co 326.082 ~0.1	Cd 含量为 0.00x%~0.3%用此线
					Th 326.092 1	
					Ce 326.098 0.1	
					V 326.108 0.3	
					W 326.116 1	
					Fe 326.133 3	
Ce	306.301 II	4.94	0.3		Th 306.303 0.1	
					W 306.318 1	
					V 306.324 0.5	
					Cu 306.342 0.3	
	320.171 II	4.72	0.1		Ti 320.159 >0.3	Ce 含量为 0.01%~1%用此线
					Dy 320.162 >1	
					Sm 320.179 >0.3	
	322.117 II	4.40	0.3		Nb 322.093 ≈0.1	
					W 322.121 0.3	
					Ni 322.127 0.3	
					Ti 322.138 >0.1	
	422.26 II	3.05	≥0.03		Mo 高含量	
	429.667 II	3.40	0.01~0.03		Zr ≈3	
	439.166 II	3.14	≥0.03		Mo 高含量	
Co	236.379 II	5.74	0.1		Si 236.382 >10	
	238.049 I	5.32	0.1~0.3		Hf 238.030 0.3~1	
					Mo 238.041 0.3	
					Zr 238.055 >0.3	
	242.493 I	5.11	0.01~0.03	0.005	Os 242.497 0.3~1	SiO 分子光谱
	308.678 I	4.24	0.03		Cr 308.677 ≈3	
					V 308.678 0.3	
	340.512 I	4.07	0.001	0.0005	Zr 340.481 0.1	
					Ti 340.509 ≈0.5	
					V 340.516 0.3	
					Cr 340.522 0.3	
					Bi 340.532 10	
					Nb 340.541 ≈0.3	
					Th 340.556 7	
	344.917 I	4.18	0.003	0.005	Mo 344.907 0.03	
	344.944 I	4.03	0.003	0.005	Mn 345.060 1	
	345.351 I	4.02	0.001	0.0005	Ni 345.289 ≈0.03	Co 含量为 0.001%~0.01%用此线
					La 345.317 ≈1	
					Cr 345.333 >0.3	
					345.374 >0.3	
					Ni 345.416 ≈0.1	
Cr	240.860 I	6.18	0.3		Mo 240.839	
					Co 240.875 1	
	267.716 II	6.18	0.01	0.003	V 267.711 0.03	
					Pt 267.715 0.3	
					Mn 267.725	
					W 267.728 >0.05	
	273.190 I	5.48	0.1	0.05	V 273.151 >0.3	
					Ti 273.157 0.3	
					Mg 273.208 1	
	301.476 I	5.08	0.003		Mo 301.469 1	
	301.493 I	5.09	0.003		Mn 301.469 1	
					Mo 301.478 >1	
					V 301.482 0.3	
					Th 301.492 0.3~1	
	425.433 I	2.91	0.001		Zr 425.357 ≈5	
					Nb 425.439 ≈2	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/%		干扰元素检出限量 w/%	备　注
			垂直法	撒料法		
Cr	427.480 I	2.90	0.001		Mo 425.443 ≈1	
					Nb 425.469 ≈2	
					Ti 425.603 ≈1	
					Ti 427.458 ≈1	
					Nb 427.467 ≈3	
					Zr 427.477 ≈5	
					Cu 427.513 ≈1	
					La 427.564 ≈0.5	
Cs	455.536 I	2.72	0.3		Ba 455.404 ≈0.01	
					Ti 455.549 ≈0.1	
	459.318 I	2.70	1		Fe 459.265	
					V 459.418 >0.01	
Cu	282.437 I	5.78	0.03	0.001	Re 282.424 0.3	Cu 含量>0.03%用此线
					Ag 282.437 3	
					Ir 282.444 0.03	
	296.117 I	5.57	0.05~0.1	0.05	U 296.094 0.3	
					V 296.112 0.3	
	297.827 I	9.55	5	2	Co 297.801 >1	
					Mn 297.812 >3	
					Mo 297.829 >0.3	
	301.084 I	5.50	≈0.2		U 301.075 0.3~1	
					W 301.076 0.03	
					Cr 301.109 0.5	
					Mn 301.116 0.5	
	310.860 I	8.82	1.0	0.1	La 310.846 0.3	
					Mn 310.863 0.3	
	324.754 I	3.82	0.0001	<0.0005	Co 324.718 0.3	Cu 含量<0.03%用此线
					Fe 324.721 10	
					Cr 324.727 1	
					Nb 324.747 1	
					Mn 324.754 0.3	
					Mo 324.762 0.3	
	327.396 I	3.78	0.0001	<0.0005	Co 327.393 0.3~1	Cu含量<0.03%用此线；含大量Mn、Ca时谱线变细而实
					Mo 327.396 ≈1	
					Ti 327.404 ≈1	
					Th 327.439 ≈0.5	
					Fe 327.445 ≈5	
Dy	263.481 Ⅱ		>0.1		Ba 263.471 1	
					Nb 263.471 1~3	
	291.395		0.1~0.3		Cr 291.373 0.03~0.1	
					Ni 291.400 1	
					Fe 291.420 1~3	
	293.453		0.1~0.3		V 293.440 0.1	
					Zr >0.1	
	313.536 Ⅱ		0.03		Fe 313.545 >3	
					Ce 313.557 1	
	315.652 Ⅱ		≈0.03		Fe 315.627 1	
					Gd 315.654 ≈1	
					Cu 315.662 1	
	330.889		<0.1		Mn 330.878 0.3	
					Ti 330.880 0.1	
					Co 330.881 0.3	
	331.989 Ⅱ	3.74	0.1		Cu 331.968 1	
					Co 331.982 0.1~0.3	
	339.36 Ⅱ	3.76	>0.03		Ce >1	
	387.212 Ⅱ	3.20	0.03~0.1		Ce >10	
					Zr ≈10	
	389.854 Ⅱ	3.77	<0.1		Ce >10	
					La >0.3	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Dy					Ti >1	
					Zr >10	
	394.47 Ⅱ	3.14	0.03		Al 394.403 ≈10	
					Ce 394.483 ≈10	
Er	258.673		0.1~0.3		Co 258.622 0.3	特征谱线
					Zr 258.686 ≈1	特征谱线
	258.704		≈0.3			特征谱线
	258.736		≥1		Co 258.722 0.3	特征谱线
	283.871		>0.1		Os 283.862 0.1	
					Ru 283.862 3	
					Ni 283.896 1~3	
	290.447		0.1		Zr 290.427 0.3	
					Hf 290.440 0.01	
					Cr 290.468 0.3	
	291.036 Ⅱ		<0.03		Ce >10	
					Gd >0.3	
					Sm >0.3	
					Zr 0.1	
	389.623 Ⅱ	3.24	>0.03		Nd 389.614 1	
	390.632 Ⅱ		0.03		Fe 390.65	
	400.797 Ⅰ		0.01~0.03		Ti 400.806 >3	
Eu	268.565 Ⅱ	4.62	<0.3		Co 268.534 0.3	
					V 268.584 0.3	
					Mn 268.594 3	
	272.778 Ⅱ	4.54	0.003~0.01		Ce >10	在 Fe 272.754(强线)与 272.802(弱线)之间
	281.395 Ⅱ	4.41	0.01		Hf 281.386 0.03~0.1	
					Re 281.396 0.3	
					Mn 281.399 1	
	282.078 Ⅱ	4.39	>0.03		Fe 282.081 >3	
					Cr 282.082 0.3	
	290.668 Ⅱ	4.26	0.01		Fe 290.642 3	
					V 290.645 0.03	
	412.974 Ⅱ	3.00	0.001			需要消除氰带
Fe	259.837 Ⅱ	4.82	0.003~0.01	0.003	Sb 259.806 0.03	
					Mn 259.817 ≈3	
					Ru 259.858 3	
	259.939 Ⅱ	4.77	0.003	0.001	Mo 259.964 >1	
	259.957 Ⅱ		0.003	0.001	Re 259.986 0.3	
					Ti 259.99 >0.3	
	288.631 Ⅰ	5.85	3~10		Co 288.644 0.3	
	290.192 Ⅰ	6.67	1	0.3	Mn 290.220 1	适于测含 Fe 1%~10%
	290.416		3	1~2	Ta 290.407 1	
					V 290.412 0.3	
	301.619 Ⅰ	5.10	≈0.3	0.1	Mn 301.645	适于测含 Fe 0.1%~1%
	301.898 Ⅰ	5.06	≈0.03	0.01~0.03	Cr 301.882 0.03	Fe 为 0.1%~1%用此线
					Ni 301.914 0.1	
	302.064 Ⅰ	4.11	0.001	0.001	Cr 302.067 0.3	适于测定低含量铁
	317.034 Ⅱ	5.60	10		Ru 317.009 3	
					Mo 317.034 0.01	
Ga	250.017 Ⅰ	5.06	0.05	0.01	Cr 249.984	
					Co 250.050 3	
	250.071 Ⅰ		≥0.3		U 250.086 0.3~1	
					Fe 250.092 0.03~0.1	
	265.987 Ⅰ	4.66	0.03		Ru 265.961 0.3	
					Al 266.039 ≥1	
	287.424 Ⅰ	4.31	0.003		Ta 287.416 高含量	
					Fe 287.417 ≈0.1	
					V 287.421 高含量	
					Ta 287.452 高含量	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/%		干扰元素检出限量 w/%	备　注
			垂直法	撒料法		
Ga	294.364 I	4.31	0.0001	<0.0003	Co 294.348 3	
					La 294.355 ≈10	
					Fe 294.357 1	
					U 294.389 0.3～1	
					Ni 294.391 0.03	
	294.418 I	4.31	0.01	0.003	Ni 294.391 0.03	
					Mo 294.421 0.3	
					W 294.439 >0.01	
					Fe 294.440 0.3	
					V 294.457 >0.1	
Gd	280.971 II	4.84	0.1		V 280.951 3	
					Mg 280.978 1	
	301.014 II	4.12	0.01			
	302.760 II	4.24	0.03		Ca 302.762 0.3	
					U 302.769 0.3	
					Mo 302.777 1～3	
	303.285 II	4.17	0.03		Ce 303.272 1	
					Sn 303.277 ～0.1	
					As 303.284 1	
					Cr 303.292 1～3	
					Fe 303.310 1～3	
	303.405 II	4.12	>0.3		Cr >0.1	
					Pr >1	
					Sn 0.003	
					Th ≈0.1	
	335.861 II	3.72	～0.03		Ti 335.840 0.01	
					Cr 335.850 0.1	
					Re 335.856 0.3	
	376.839 II	3.36	>0.1			
	391.659 II	3.77	0.1		Bi 0.3	
Ge	241.736 I	6.01	0.01	0.003	Co 241.733 1	
					V 241.735 >0.3	
	258.919 I	4.94	0.3		Ru 258.903 3	
					Th 258.906 0.3	
					W 258.916 1	
	265.118 I	4.85	0.001	0.0003	Ce 265.101 0.5	Ge 含量为 0.001%～0.03%时用此线
					Fe 265.129 高含量	
	265.158 I	4.67	0.001	0.001	Pb 265.04 >10	
					Fe 265.171 1	
					Ru 265.184 1	
	269.134 I	4.67	0.005	0.003	V 269.079 0.5	
					Mn 269.098 ≈5	
					Cr 269.104 0.1	
					Ta 269.131 ≈1	
					W 269.156 ≈3	
	279.394 I		1		Fe 279.39 高含量	
					279.416 高含量	
	303.906 I	4.96	0.001	0.0003	Nb 303.918 0.5	
					303.940 0.5	
					Ir 303.926 0.3	
					U 303.926 0.3	
					Fe 303.931 3	
					In 303.936 ≈0.005	
Hf	234.744 II	6.07	0.3		Co 234.739 0.3	
					Ni 234.752 0.1～0.3	
					Ba 234.757 0.3	
	263.871 II	4.70	0.01	0.05～0.1	Ru 263.851 1	
					Ti 263.870 3	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Hf					Zr 263.871 0.3	
					Mo 263.876 >0.3	
					Cr 263.890 1	
	264.141 Ⅱ	5.73	0.01	0.05	Ba 264.137 >0.3	
					Th 264.149 0.1	
					Fe 264.165 0.3	
	264.729 Ⅱ	5.72	0.03	0.3	Re 264.712 0.1	
					Fe 264.755 1	
	277.336 Ⅱ	5.25	0.01	0.1	Fe 277.323	
	282.022 Ⅰ	4.77	0.01	0.05~0.1	Re 281.996 0.03	
					Co 282.001 1	
					Er 282.018 0.1	
	286.637 Ⅱ	4.32	0.03	0.3	Mo 286.626 >1	
					W 286.637 >0.3	
					V 286.641 0.1	
					Fe 286.663 0.3	
Hg	253.652 Ⅰ	4.88	0.03	0.003	Co 253.596 >0.1	
					Pt 253.648 1	
	312.567 Ⅰ	8.85	<0.3		Th 312.546 0.1	
					Fe 312.565	
	313.155 Ⅰ	8.82	0.3		Be 313.107 0.001	
					Hf 313.181 0.03	
	313.184 Ⅰ	8.85	0.3		Cr 313.206 0.01	
					Zr 313.206 0.01	
Ho	339.898 Ⅱ		~0.01		Co 339.881 1	
					Ce 339.892 ≈1	
					Fe 339.933	
	341.646 Ⅱ		>0.01		Co ≈1	
					Er ≈0.1	
	345.600 Ⅱ		~0.01		Dy 0.1	
					Er >1	
					Y 1.0	
	388.896 Ⅱ		0.1			
	389.102 Ⅱ	3.2	≈0.03		Ce 389.99 ≈3	
	416.303 Ⅰ		0.01~0.03		Gd 416.311 0.3	
					La 416.330 >10	
In	260.176 Ⅰ	5.04	0.5~1	0.3	Mo 260.182 3	
					Re 260.188 0.3	
	293.262 Ⅰ	4.49	0.03		Ni 293.262 3~10	
					Ta 293.269 0.3	
	303.936 Ⅰ	4.08	0.001	0.0003	Ge 303.906 ≈0.003	
					Ir 303.926 0.3	
					Fe 303.931 ≈3	
					W 303.931 1	
					Nb 303.940 1	
					Co 303.956 1	
					Cr 303.978 0.1	
					Nb 303.981 0.3	
	325.609 Ⅰ	4.08	0.001		Fe 325.589 1~3	
					Mn 325.614 ≈0.01	
					Mo 325.621 0.1	
					Th 325.627 0.3	
					Ru 325.633 1	
	325.856 Ⅰ	4.08	0.001	0.003	Mn 325.841 0.1	
					Mo 325.868 高含量	
	451.132 Ⅰ	3.02	0.0003		Ti 451.117 >3	用全色相板摄谱
					Sn 451.130 0.5	
Ir	289.715 Ⅰ		0.1~0.3		Er 289.696 0.1	
					Th 289.707 0.3~1	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Ir	292.479 I	4.24	0.01~0.03		Re 292.460 0.1~0.3	
					V 292.464 0.01	
	313.332 I	4.74	0.03		Cd 313.316 0.3	
					V 313.333 0.01	
	322.078 I	4.20	0.01		Pb 322.054 ≈10	
					Nb 322.092 0.1~0.3	
					Ni 322.127 <3	
K	321.715 I	3.86	>3		Mn 321.694 0.1	
					V 321.711 0.1	
	344.672 I	3.60	0.5~1		Co 344.608 0.1	
					Ni 344.626 0.03	
					Zr 344.661 ≈1	
					344.736 ≈1	
	404.414 I	3.06	0.1~0.3			在中型摄谱仪上，用 Li_2CO_3 抑制氰带后方可使用
	404.720 I	3.06	0.1~0.3			
	766.491 I	1.62	<0.001			用玻璃光学系统红色相板摄谱
	769.898 I	1.61	0.001			
La	261.034 Ⅱ	5.66	0.1	0.1	Mn 261.020 >0.3	
					Nb 261.027 3	
	289.307 Ⅱ	7.04	≈0.3		Mo 289.281 0.3	
					Pt 289.322 1	
					Cr 289.325 0.01	
					V 289.332 0.03	
	324.513 Ⅱ	4.00	0.01	0.03	Ce 324.516 ≈1	
					Sm 324.516 0.1	
					Ni 324.537 ≈3	
					Cr 324.548 0.2	
					324.554 0.2	
	333.749 Ⅱ	4.12	0.01	0.01~0.03	Mg 333.668 ≈0.2	
					Co 333.717 ≈3	
					Ta 333.749 ≈1	
					Th 333.749 ≈0.3	
					Fe 333.766 ≈3	
					Ta 333.779 ≈1	
					Cu 333.784 0.5	
	433.374 Ⅱ	3.03	0.003~0.01		Zr 433.326 >10	
					Ce 433.34 高含量	
Li	256.254 I	4.83	≈1			
	274.131 I	4.52	0.1	0.05	Cr 274.106 0.1	
					Fe 274.111 3	
					Mo 274.132 1	
	323.261 I	3.83	0.003~0.01	0.003	W 323.248 1	
					Sb 323.249 ≈0.1	
					Nb 323.279 ≈1	
					Ti 323.279 ≈0.05	
					Co 323.287 ≈0.1	
					Ni 323.296 ≈0.01	
	610.364 I	3.87	0.005		Ca 610.27	用玻璃光学系统全色相板摄谱
	670.784 I	1.85	0.001			用玻璃光学系统全色相板摄谱
Lu	239.218 Ⅱ	7.31	≈0.1			
	261.542 Ⅱ	4.74	0.001		W 261.512 1	
					Fe 261.542	
	276.574 I		≈0.1		Er 276.561 0.3	
					V 276.567 0.1	
	290.030 Ⅱ	5.81	0.01		Mn 290.016 3	
					Cr 290.026 3	
					Mn 290.054 1	
	291.139 Ⅱ	6.02	0.003		Yb 291.15 >0.3	
					Er	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/%		干扰元素检出限量 w/%	备　注
			垂直法	撒料法		
Lu					Th　≥1	
Mg	277.669 I	7.18	≈0.1			特征线组 Mg 含量为 0.1%～1% 可用此线组
	277.829 I	7.18	≈0.1		Fe　277.822	
	277.983 I	7.18	≈0.03			
	278.142 I	7.18	≈0.1			
	278.297 I	7.18	≈0.1			
	279.079 Ⅱ	8.86	≈0.3	0.1	Mn　279.091　>3	Mg0.1%～1%的沉淀用此线
	279.553 Ⅱ	4.43	0.001		Fe　279.501	
					Fe　279.554	
					Cr　279.581	
	285.213 I	4.34	0.0003～0.0001	0.0003	Fe　285.180	Mg<0.1%的沉淀用此线
					Fe　285.213	
					Na　285.282　>1	
	291.552 I	10.0	1	1	V　291.533　0.3	谱线扩散
					Mo　291.538　1	
Mn	238.405 I	5.21	≈3		Zr　238.416　3	
					V　238.427　1	
	259.576 I	7.10	0.05～0.1			Mn 含量为 0.1%～5%用此线 SiO 分子光谱
	260.569 Ⅱ	4.75	0.03			用于 Mn 含量为 0.005%～0.3%的测定
	263.817 Ⅱ	8.12	0.5	0.3	Mo　263.830　1	用于 Mn 含量为 1%～10%的测定
	263.984 Ⅱ	8.75	1	0.5	Ir　263.971　0.01	用于 Mn 含量为 1%～10%的测定
	279.482 I	4.44	0.0005	0.0003	Fe　279.470　1	特征线组 适于微量 Mn 的测定
					Co　279.481	
					Fe　279.500　3	
	279.827 I	4.43	0.0005	0.0003	Mg　279.806　0.3	
					Zr　279.827　0.1	
					Ta　279.840　1	
	280.106 I	4.43	0.0005	0.0003	Cr　280.077　0.3	
					Ir　280.082　1～3	
					Zn　280.087　0.3	
	293.306 Ⅱ	5.41	0.005	0.005	Tb　293.305　0.3	
					Ru　293.324　3	
Mo	260.280 Ⅱ	6.22	1		W　260.280　高含量	
	281.615 Ⅱ	6.06	0.01	0.003	V　281.597　0.03	
					Al　281.618　10	
					Mn　281.632　1	
	287.151 Ⅱ	5.86	0.01	0.005	W　287.136　1	Mo 含量为 0.01%～1%用此线
					Ta　287.141　>0.2	
					Cr　287.163　0.1	
					Ru　287.163　1	
	290.306 Ⅱ	7.55	0.3	0.1	V　290.307　0.1	
					Ti　290.318　3	
					Co　290.319　1	
					Tb　290.321	
	308.561 I	6.10	0.03～0.1		Ta　308.553　3	
	313.259 I	3.96	0.0003	0.0003	Nb　313.213　1	
					Fe　313.251　3	
					Ce　313.259　1	
					V　313.259　1	
					Ce　313.264　1	
					Ta　313.264　0.5	
					Nb　313.276　1	
					Mn　313.28　2	
					Cr　313.282　0.3	
					Ru　313.288　1	
	317.035 I	3.91	0.0003	0.0003	W　317.020　1	Mo 含量<0.03%用此线
					Ta　317.029　0.1	
					Fe　317.034　>1	
					Th　317.043　0.3	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Na	268.034 I	4.62	>1	1~2	Fe 268.016 3	
	268.044 I	4.62	>1	1~2	Cr 268.034 1	
					Ca 268.036	
					Fe 268.045 3	
	285.283 I	4.35	0.3	0.3	Mg 285.213 >0.01	Na含量为0.5%~10%的测定，此双线可用
	285.303 I	4.35	0.3	0.3	Re 285.286 0.3	
					V 285.286 0.3	
	330.232 I	3.75	0.03	0.03	Zn 330.258 0.03	Na含量为0.0x%~1%用此双线
	330.299 I	3.75	0.03	0.03	Cr 330.287 高含量	
					Mn 330.328 1	
					La 0.1	
					Zn 330.294 0.03	
	588.995 I	2.11	0.0001~0.0003			用玻璃光学系统全色相板摄谱
	589.592 I	2.10				Mo含量高时用Na588.995线
Nb	241.246 II	6.17	0.3~1	1	Ni 241.264 0.5	
					V 241.268 0.3	
	284.114 II	4.74	0.1	0.1~0.3	V 284.104 0.3	
	290.824 II	4.55	0.03	0.05	Mn 290.799 0.5	
					Mo 290.816 3	
					W 290.826 1	
					Re 290.834 0.3	
	292.781 II	4.75	0.01	0.03	Fe 292.753 1	
					W 292.753 ≈10	
					V 292.764 0.1	
					Co 292.767 1	
					Pt 292.810 高含量	
					W 292.819 ≈10	
	295.088 II	4.71	0.01	0.03	Re 295.083 0.3	
					Mn 295.116 3	
					Th 295.121 1	
					Cu 295.126 高含量	
	309.418 II	4.52	0.003	0.01~0.03	Cu 309.399 >1	
					V 309.419 高含量	
	313.078 II	4.40	0.003	0.005	V 313.03 0.1	
					Be 313.042 >0.001	
					Ti 313.080 0.03	
					Be 313.107 >0.001	
					Th 313.107 0.1	
	316.340 II	4.30	0.003	0.005	Ta 316.312 0.1	
					Mo 316.328	
					W 316.328 ≈1	
					Cr 316.375	
Nd	311.517 II		≥0.3		Cr 311.486 1	
					Sm 311.504 >1	
					Er 311.509 0.3	
					Yb 311.533 >0.3	
					Mn 311.546	
	313.360 II		0.1~0.5		V 313.332 0.01	
					Th 313.362 0.3	
					W 313.388 0.3	
	415.608 II	3.16	≈0.03		Zr 415.623 0.1	需消除氰带
	428.452 II	3.52	0.1			
	430.357 II	2.88	≈0.03		Ca 430.253 >10	
					Pr 430.36 >0.3	
Ni	232.579 I	5.49	0.03	0.01	Co 232.561 0.3	Ni含量>0.1%用此线
					Mo 232.581 1	
	233.170 I		1		Co 233.169 0.5	
					Ta 233.198 1	
	239.452 II	6.85	0.1			SiO分子光谱

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Ni	299.260 I	4.17	0.01	0.01	Re 299.257 0.01 Mo 299.283 0.3	
	305.082 I	4.09	0.001	0.0003	Hf 305.075 0.01 V 305.089 0.1 Co 305.093 >1	黑度变化明显，Ni含量为0.001%~0.03%用此线
	341.477 I	3.65	0.001	0.0003	Ru 341.464 1 Zr 341.466 0.3 Co 341.473 0.2 Dy 341.483 0.1	背景较深
Os	283.863 I	5.00	~0.1		W 283.867 3 Cr 283.878 Ni 283.895	
	290.906 I	4.26	0.03	0.001	Cr 290.805 >0.3 V 290.881 >0.01 Fe 290.886 1 Mo 290.911 >0.1	
	305.866 I	4.05	0.03		Ru 305.865 ≥3 Re 305.878 ≈0.3 Ru 305.878 ≥3 Fe 305.908	
P	253.399 I	7.22	0.5	0.5	Fe 253.380 1	
	253.565 I	7.22	0.1	0.1	Fe 253.560 0.03	
	255.328 I	7.18	0.1	0.1	Cr 255.306 1 Co 255.307 0.1 Fe 255.318 1	
	255.490 I	7.18	0.5	0.2	V 255.486 0.5 Fe 255.522 3	
Pb	239.379 I	6.50			Hf 239.383 0.3	Pb含量为0.3%~5%用此线
	247.638 I	5.98	≥0.03		Fe 247.465 3	Pb含量为0.03%~1%用此线
	266.317 I	5.97	0.03	0.003	V 266.325 >0.3 Cr 266.342 0.1	
	280.200 I	5.74	0.003		Ni 280.227 1 Mg 280.27 >0.1	
	283.307 I	4.37	0.001	0.0003	W 283.295 1 Fe 283.310 10 Mn 10 Hf 283.327 0.1	Pb含量<0.03%用此线
Pd	292.249 I	5.05	0.1	0.01	Fe 292.262 3	
	302.791 I	5.05	<0.01		Mo 302.777 1~3	
	324.270 I	4.64	0.003		Ti 324.199 >0.1 Ta 324.283 0.1 Ni 324.305 >0.01	
	340.458 I	4.46	0.003		Fe 340.436 0.3 Re 340.472 0.01	
	342.124 I	4.37	0.003		Th 342.119 0.03 Cr 342.121 0.3 Ni 342.134 0.1~0.3	
Pr	316.824 II		1		V 316.814 0.1 Fe 316.815 1 Ti 316.852 0.01	
	317.231 II		1		Fe 317.207 3 Ce 317.230 0.3	
	390.843 II	3.17	0.1			
	396.483 II	3.18	0.1			
	396.526 II	3.33	0.1			
	417.942 II	3.17	0.03		Ce 417.928 ≈1	需消除氰带
	422.298 II	2.99	≈0.03		Ca 422.673 10	
Pt	265.945 I	4.66	0.001		V 265.897	Al 266.039（10%）光晕影响

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	散料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Pt					Ru 265.961	
					Cr 265.974	
					Ga 265.986	
	283.030 I	4.38	0.01		Mo 282.994 7	
					Ta 283.001 2	
					Ir 283.017 1	
					W 283.028 1	
					V 283.040 0.3	
					Cr 283.046 0.3	
	291.354 I	5.51	0.3		Sn 291.354 ≥0.3	
					Cr 291.373 0.1	
	292.979 I	4.23	0.003~0.01		Co 292.951 0.3~1	
					Fe 292.962 3	
					Hf 292.962 0.1	
	306.471 I	4.04	0.001		Re 306.460 0.3	
					Ni 306.462 >0.03	
					Ru 306.484 >0.1	
Rb	420.185 I	2.95	0.1			
	421.556 I	2.94	0.3		Fe 421.542	
					Sr 421.552 0.005	
	780.023 I	1.59	≤0.001			玻璃光学系统，红外相板摄谱
	794.760 I	1.56	≤0.001			
Re	345.180 I	3.59	0.003		Mo 345.175 1	
					Fe 345.191 1	
	346.047 I	3.58	0.001		Mn 346.032 >0.05	
					Cr 346.043 0.1	
					Co 346.072 1	
					Mo 346.078 >0.05	
	346.472 I	3.57	<0.003		Sr 346.446 0.03	
					Cr 346.483 1	
Rh	312.370 I	3.96	0.1~0.3		Ti 312.377 0.1~0.3	
	326.314 I	4.21	0.03		Co 326.321 0.3	
					Fe 326.337 3	
	332.309 I	3.92	0.003		Ir 332.287 1	
					Ti 332.294 ≥0.03	
					Cr 332.325 3	
	339.635 I	3.64	0.003		Er 339.683 0.1	
					Fe 339.698 1	
	343.489 I	3.60	0.001		Mo 343.479 0.3	
					Ru 343.518 0.3	
Ru	281.003 I	4.67	0.1~0.3		Cr 280.994 1~3	
					V 281.015 0.1	
					Fe 281.026 3~10	
	281.065 II	8.90	0.03~0.1		F 281.027 3	
					V 281.027 0.1	
	288.653 I	4.63	0.1		Fe 288.631 1	
					Co 288.644 0.3	
	343.6737 I	3.75	0.01		Ir 343.701 0.3	
					Ni 343.73 ≥1	
	349.8944 I	3.54	0.03		Rh 349.873 0.03	
					Ti 349.909 0.3	
Sb	238.364 I	7.48	1~3		Cr 238.333 0.3~1	
					Co 238.346 0.3	
	259.806 I	5.82	0.01	0.003	W 259.811 10	Sb 含量为 0.00x%~0.1%用此线
					Mn 259.817 3	
					Fe 259.837 10	
	268.276 I	6.90	0.3		V 268.287 0.1	
					Mn 268.301 1	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Sb	269.225 I	6.63	1	0.1	Fe 269.225 3	
					Th 269.242	
	287.792 I	5.36	0.01		Ta 287.768 0.3	
					Cr 287.798 0.3	
					V 287.802 0.3	
					Nb 287.816 10	
					Ta 287.820 10	
					Cr 287.845 0.3	
	326.750 I	5.82	0.03		V 326.770 0.03	
					Mn 326.779 0.3	
Sc	255.238 Ⅱ	4.88	0.003		W 255.248 >5	
					Ti 255.253 5	
	256.026 Ⅱ	4.85	0.01	0.03	In 256.022 高含量	
					Fe 256.027 3	
	282.213 Ⅱ	7.87	>0.3		Cr 282.201 1	
					Mo 282.203 3	
	326.990 I	3.79	0.003		W 326.962 >1	
					Ge 326.949 0.003	
					W 327.026 >1	
	335.373 Ⅱ	4.01	0.001		W 335.355 3	
					Cr 335.361 0.1	
					Ru 335.364 1	
					Zr 335.366 0.1	
					W 335.374 3	
					Fe 335.406 0.1	
					Mo 335.412 5	
					Zr 335.438 0.1	
	336.895 Ⅱ	3.68	0.003		Eu 336.905 0.1	
					Ti 336.905 0.1	
	424.683 Ⅱ	3.23	≥0.0003		Ce 1	
	431.408 Ⅱ	3.49	~0.003			
Sm	320.718 Ⅱ	3.87	>0.1		Fe 320.709 (弱线)	
					Dy 320.710 >0.1	
	336.596 Ⅱ		0.03~0.1		Cu 336.535 >3	
					Ni 336.576 0.01	
					Ce 336.583 >1	
	425.640 Ⅱ	3.29	0.1			
	426.269 Ⅱ	3.28	0.03~0.1		Ti 426.313 >1	
	427.967 Ⅱ	3.17	0.03~0.1		Ce 428.014 >10	
	428.078 Ⅱ	3.38	0.03~0.1			
	442.435 Ⅱ	3.28	0.03~0.1			
Si	243.516 I	5.87	0.03			
	243.878 I	5.08	0.3~1		Re 243.847 0.3	
					Co 243.904 0.3	
	250.690 I	4.95	0.003	0.003		
	251.612 I	4.95	0.001	0.001	Mo 251.611 (弱线)	
					V 251.611 (弱线)	
	256.864 I	6.73	5~10		V 256.839 3	
					Zr 256.887 0.1	
	257.713 I	6.72	≥10		Fe 257.609 0.3~1	
					V 257.729 1	
	288.158 I	5.08	<0.001	0.001	Co 288.158 高含量	
Sn	233.481 I	5.51	≤0.1			Sn 含量为 0.1%~1%用此线
	242.170 I	6.18	0.01~0.03			SiO 分子光谱
	242.95 I	5.51	0.01			
	281.257 I		0.3~1		Mn 281.284 0.3	
	283.999 I	4.78	0.001	0.0003	Mn 284.000 0.1	Sn 含量<0.03%用此线
					Cr 284.002 0.1	
					W 284.009 10	
					V 284.010 3	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 散料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Sn	285.062 I	5.41	0.01～0.03		Os 285.076 0.3	Sn 含量为 0.03%～1%用此线
					Mo 285.078 3	
					Mg 285.212 >1	
	291.354 I	6.38	0.1～0.3		Cr 291.372 0.1	Sn 含量为 0.1%～1%用此线
	303.278 I	6.21	<0.1		As 303.285 0.3	
					Cr 303.287 1	
	303.412 I	4.30	0.001	0.0005	V 303.344 0.3	当 Mn 为高含量时用此线
					V 303.382 0.3	
					Th 303.407 0.3	
					Cr 303.419 0.03	
					Fe 303.453 10	
	317.505 I	4.33	0.001	0.0005	La 317.488 10	
					Co 317.490 ≈0.3	
					Mo 317.505 1	
Sr	247.160 II	8.05	≈3		Rh 247.147 0.3	
	293.183 I	4.23	≈0.5		Rh 293.194 0.3	KCl 中灵敏度约 0.1%
	346.446 II	6.62	0.01	0.03	Cr (弱线)	Sr 含量为 0.01%～1%用此线
					Y 0.01	
	460.733 I	2.69	0.003			宜用高色散摄谱仪全色相板摄谱
Ta	265.327 I	4.91	≥0.03		V 265.292 1	
					Mo 265.338 1	
					W 265.356 3	
					Sr 265.358 0.1	
	268.511 II	4.62	0.03	0.03	V 268.513 0.01	SiO 分子光谱
					Ti 268.514 >1	
	271.467 I	4.56	0.03	0.03	Fe 271.441 0.3	
					Ni >10	
					Os 271.441 0.3	
					Th 271.441 0.3	
Tb	321.893 II		0.03		Cr 321.869 0.3	
					V 321.887 0.1	
					Co 321.915 0.3	
	332.440 II		≈0.03		Fe 332.453	
	350.917 II	>3.5	0.1			
	384.875 II	>3.2	≈0.1		Ce 384.860 >3	
					La 384.901 ≈0.1	
	389.919 II		0.03～0.1			
	427.851 II		0.03～0.1		Ti 427.822 >0.3	
					Ce 427.825	
	432.648 I		≥0.03		Fe 432.576	
					Fe 432.676	
Te	238.325 I	5.78	0.03	0.03	Fe 238.324 0.3	
					Cr 238.333 0.03	
					Co 238.346 0.03	
					Mo 238.352 10	
	238.576 I	5.78	>0.01	0.01	Ta 238.573 10	
					Cr 238.574 3	
					W 238.579	
					Co 238.581 10	
	253.070 I	5.49	0.3～1		Fe 253.069	
	317.511 I	6.78	3		Co 317.491 0.3	
					Sn 317.502 0.03	
Th	259.705 II	4.77	0.1～0.3		Mo 259.722 10	
	269.242 II	4.60	0.01～0.03			当 V、Zr 同时都高，(Th 含量>0.03%)用此线
	283.730 II		0.01～0.03		In 283.692 1	
					Co 283.715 0.3	
					Zr 283.723 0.1	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/% 垂直法	灵敏度/% 撒料法	干扰元素检出限量 w/%	备注
Th					W 283.734 1	
	284.282 Ⅱ	4.55	0.03	0.1	Nb 284.264 >0.03	
					Ta 284.281 1	
	287.041 Ⅱ	4.55	>0.01	0.01	Cr 287.043 ≥0.1	Th含量为0.01%～0.3%用此线
					V 287.054 0.03	
	323.929		≈1		Ti 323.904 0.03	
					Fe 323.943 0.1	
Ti	241.836 Ⅰ	5.12	1		Fe 241.787 10	
					Pt 241.806 1	
	264.663 Ⅰ	4.73	0.01		Mo 0.3	
					W >1	
	284.194 Ⅱ	4.97	0.1		Ru 284.168 >1	
					Mn 284.208 >1	
	295.613 Ⅱ	4.24	0.01		Mn 295.61 >1	
					Cr 295.633 1	
	308.803 Ⅱ	4.07	0.003	0.003	Th 308.803 ≈1	Ti含量<0.05%用此线
					Cu 308.813 >1	
	334.904 Ⅱ	4.31	≤0.001			
	337.280 Ⅱ	3.68	0.001		Mo 337.292 ≈3	
					Co 337.323 ≈3	
					W 337.323 1	
	337.759 Ⅱ		0.003～0.01		Co 337.706 3	
					Zr 337.745 1	
					V 337.762 0.1	
Tl	276.787 Ⅰ	4.48	0.03	0.003	Fe 276.752 1	
					Mo 276.809 3	
					V 276.813 1	
	282.616 Ⅰ	5.34	1		W 282.608 高含量	
					Ta 282.618 3	
	291.832 Ⅰ	5.21	0.1	0.03	Fe 291.802 0.3	
					Zr 291.824 0.1	
					W 291.825 0.3	
	292.152 Ⅰ	5.21	0.3	0.1	W 292.111	
					Pt 292.138 1	玻璃光学系统，全色相板摄谱
	535.046 Ⅰ	3.28	<0.001			
Tm	313.126 Ⅱ	3.96	0.01～0.03		Be 313.1072 0.001	
					Cr 313.121 0.3	
	376.192 Ⅱ	3.29	0.1		Ti >1	
	379.577 Ⅱ	3.29	0.1		Ti ≈3	
	435.993 Ⅱ	2.84	0.01～0.03		Zr 435.97 >0.3	
U	263.553		0.3		Ta 0.1	
					Zr 0.3	
	286.568 Ⅱ	4.32	0.05～0.1		W 286.557 0.3	U含量为0.1%～x%用此线
					Nb 286.560 0.13	
					Zr 286.560 0.3	
	290.691		0.1～0.3			
	290.828		0.1～0.3			
V	242.012 Ⅰ	5.19	0.3～1		Mn 242.011 3	Si分子光谱
	290.307 Ⅱ	4.59	0.01			
	295.207 Ⅱ	4.55	0.01	0.003	W 295.223 0.3	V含量为0.01%以上用此线
	305.219 Ⅰ	4.08	0.1	0.01	Cr 305.222 >0.3	
					Mo 305.232 0.3	
	318.341 Ⅰ	3.91	0.001	0.001	Ni 318.325 1	V含量为0.001%～0.03%用此线
					Cr 318.332 0.03	
					Er 318.341 0.03	
					W 318.351 3	
					Ce 318.352 0.03	
	318.398 Ⅰ	3.90	<0.001	<0.001	Ti 318.397 0.3	
					Ca 318.421 0.3	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/%		干扰元素检出限量 w/%	备注
			垂直法	撒料法		
V					Ni 318.436 0.01	
	318.540 I	3.96	0.001	0.001	Fe 318.531 10	
W	265.738 I		0.3		Ti 265.719 0.5	
					Hf 265.750 1	
	272.435 I		0.01～0.03			
	289.645 I	4.63	0.01		V 289.621 0.01	
					Cr 289.646 0.05	
	294.698 I	4.57	0.01	0.003	V 294.653 0.03	W 含量为 0.003%～0.1%用此线
					Nb 294.689 0.3	
					Ta 294.691 3	
					Ni 294.743 10	
Y	242.219 Ⅱ	5.52	0.03		V 242.198 0.3	Si分子光谱
					Sb 242.214 10	
					W 242.225	
	319.562 Ⅱ	3.99	0.01		Ni 319.557 0.5	
	320.332 Ⅱ	3.98	0.003～0.01		Co 320.303 0.3	Y含量＜0.1%用此线
					Nb 320.335 0.3	
					Ti 320.344 0.1	
	321.668 Ⅱ	3.99	0.003～0.01	0.005	Mn 321.694 0.3	
					Ti 321.706 0.01	
					V 321.711 0.03	
	324.228 Ⅱ	4.01	0.003		Ti 324.198 0.01	
					W 324.202 1	
					Zr 324.216 0.01	
					Th 324.225 3	
					Nb 324.241 0.1	
	332.788 Ⅱ	4.14	0.001～0.003		W 332.762 3	Y 含量为 0.003%～0.03%用此线
					Zr 332.767 3	
					V 332.798 3	
					Co 332.821 2	
Yb	265.374 Ⅱ	7.33	0.03～0.1	0.1～0.3	Cr 265.358 0.3	
					V 265.382 1	
	274.866 Ⅱ		1	1	W 274.857 0.3	
					Zr 274.861 1	
					Nb 274.884 0.3	
	275.048 Ⅱ	7.16	0.03～0.1	0.3	Fe 275.014 ＞1	
					Ti 275.014 1	
	289.139 Ⅱ	4.23	0.003～0.01	0.01	Th 289.125 0.1	
					Cr 289.141 0.3	
					V 289.164 0.1	
	328.937 Ⅱ	3.77	0.0003	0.001	Mo 328.901 ＞0.1	Yb含量为0.0003%～0.03%用此线
					V 328.938 ＞0.3	
					Fe 328.943 3	
Zn	277.087 I	8.50	＜0.3		Fe 277.070 3	
					W 277.088 0.3	
	301.835 I	8.11	3		Os 301.804 0.03	
					Cr 301.849 0.3	
	328.233 I	7.78	0.1		Ti 328.233 ＞0.1	Zn含量为0.1%～1%用此线
					V 328.253 0.1	
	330.259 I	7.78	0.01～0.03		Na 330.232 0.1	
	330.294 I	7.78	0.01～0.03		Na 330.299 0.1	
	334.502 I	7.78	0.01	0.003	La 334.356 0.1	Zn含量为0.01%～0.3%用此线
	334.557 I	7.78	0.01	0.003	Mo 334.474 0.03	
					Ti 334.493 3	
					Ru 334.531 1	
Zr	233.038	7.07	＞0.5		Co 233.035 0.3	
					V 233.046 0.01	
	235.745	7.01	＞0.1		Co 235.750 10	

续表

元素	分析线 λ/nm	激发电位 E_i/eV	灵敏度/%		干扰元素检出限量 w/%	备注
			垂直法	撒料法		
Zr	257.142	4.91	0.01		Sn 257.159 0.1	Zr 含量为 0.01%~0.3%用此线
	272.261	4.72	0.01		V 272.255 0.1	
					Cr 272.274 0.3	
	327.305	3.95	0.001	0.01	Mn 327.301 0.1	
					V 327.302 0.1	
					Ta 327.313 0.3	

参 考 文 献

1 《光电光谱分析》之 4．光谱实验室．1993；10（增刊）：4~44

2 David R Lide ph D ed．CRC Handbook of Chemistry and Physics，73rd Ed．U. S. A.：CRC Press Inc，1993：10~129

3 冶金工业部科技情报产品标准研究所编译．光谱线波长表．北京：中国工业出版社，1971：797

4 杭州大学化学系分析化学教研室编．分析化学手册，第三分册．北京：化学工业出版社，1983：866

5 《发射光谱分析》编写组．发射光谱分析．北京：冶金工业出版社，1979：373

6 赵玉海编．发射光谱分析背景扣除速查表．北京：国防工业出版社，1980：116

7 福建省地质中心实验室编．光谱分析仪器与常用技术资料(内部资料)．1977

8 李廷钧编．发射光谱分析．北京：原子能出版社，1983：448

9 葛维宝编．一米平面光栅摄谱仪光谱图表．见：激光显微光谱分析．北京：地质出版社，1984：1

第三章　发射光谱实验技术及仪器设备

第一节　样品制备及进样技术

一、标样的制备

1. 标样的制备方法

发射光谱分析是一种相对分析方法，必须用一套标样进行比较，以鉴别元素的存在，或确定元素的含量。所谓标样是指一系列含有待测元素准确含量的成套样品。发射光谱分析的标样类型很多，可分为固体标样，粉末标样，溶液标样等。不同类型的标样，有不同的制备方法。

（1）固体标样的制备　金属与合金的棒状和块状标样，通常采用熔铸法或粉末冶金法制备。前者是将计算好的基体金属和配入元素在熔炉中冶炼，然后浇铸成型。后者是将计算好的基体金属和配入元素先制成粉末，充分混匀后置人压模，压成一定尺寸的棒或块，然后于氩气氛炉中煅烧而成。

（2）粉末标样的制备　粉末标样的制备方法，通常有三种：①将待测组分以溶液形式加入基体溶液中，混匀后在适当温度下蒸干成盐类粉末，或者再灼烧成氧化物粉末；②将标样各组分以粉末形式机械混合，研磨而成；③将分析组分以溶液形式加入基体粉末中，若基体为金属粉末，则应在氩气氛中干燥或灼烧。

（3）溶液标样的制备　将基体成分用适当溶剂溶解，制得基体溶液。分析元素制成单元素标液，按照确定的浓度系列，取不同体积的分析元素标液，加入到等量的基体溶液中，稀释至一定体积（注意溶液要保持一定的酸度），摇匀后即得不同浓度的标样系列。也可采用逐级稀释法。

3-1 为元素换算因素表，表 3-2 为标准溶液的配制表。

表 3-1　元素换算因数表

元素	元素 A_r/(kg·mol^{-1})	常用化合物	常用化合物 M_r/(kg·mol^{-1})	元素换算成化合物的换算因子	元素	元素 A_r/(kg·mol^{-1})	常用化合物	常用化合物 M_r/(kg·mol^{-1})	元素换算成化合物的换算因子
Ag	107.88	Ag_2O	231.76	1.0742	Cu	63.54	CuO	79.54	1.2518
Al	26.98	Al_2O_3	101.96	1.8895	Dy	162.51	Dy_2O_3	373.02	1.1477
As	74.91	As_2O_3	197.82	1.3204	Er	167.2	Er_2O_3	382.40	1.1435
Au	197.0	—	—	—	Eu	152.0	Eu_2O_3	352.00	1.1579
B	10.82	H_3BO_3	61.85	5.7163	F	18.99	CaF_2	78.06	2.0553
Ba	137.36	$BaCO_3$	197.37	1.4368	Fe	55.85	Fe_2O_3	159.70	1.4297
Be	9.013	BeO	25.01	2.7748	Ga	69.72	Ga_2O_3	187.44	1.3442
Bi	209.00	Bi_2O_3	466.0	1.1148	Gd	157.26	Gd_2O_3	362.52	1.1526
C	12.01	纯碳粉	—	—	Ge	72.60	GeO_2	104.60	1.4408
Ca	40.08	CaO	56.08	1.3992	Hf	178.6	HfO_2	210.60	1.1792
Cd	112.41	CdO	128.41	1.1423	Hg	200.61	HgS	232.68	1.1599
Ce	140.13	CeO_2	172.13	1.2284	Ho	164.93	Ho_2O_3	377.86	1.1455
Co	58.94	Co_2O_3	165.88	1.4072	In	114.82	In_2O_3	277.64	1.2090
Cr	52.01	Cr_2O_3	152.02	1.4614	Ir	192.2	金属	—	—
Cs	132.91	CsCl	168.37	1.2668	K	39.10	K_2SO_4	174.27	2.2285

续表

元素	元素 A_r/(kg·mol⁻¹)	常用化合物	常用化合物 M_r/(kg·mol⁻¹)	元素换算成化合物的换算因子	元素	元素 A_r/(kg·mol⁻¹)	常用化合物	常用化合物 M_r/(kg·mol⁻¹)	元素换算成化合物的换算因子
La	138.92	La_2O_3	325.84	1.1728	Sb	121.75	Sb_2O_3	291.5	1.1971
Li	6.94	Li_2CO_3	73.89	5.3235	Sc	44.96	Sc_2O_3	137.92	1.5338
Lu	174.99	Lu_2O_3	397.98	1.1372	Se	78.96	SeO_2	110.96	1.4053
Mg	24.32	MgO	40.32	1.6579	Si	28.09	SiO_2	60.09	2.1392
Mn	54.94	MnO_2	86.94	1.5825	Sm	150.4	Sm_2O_3	348.8	1.1596
Mo	95.95	MoO_3	143.95	1.5003	Sn	118.70	SnO_2	150.7	1.2696
Na	22.99	Na_2CO_3	105.99	2.3051	Sr	87.63	$SrSO_4$	183.7	2.096
Nb	92.91	Nb_2O_5	265.82	1.4305	Ta	180.95	Ta_2O_5	441.9	1.2211
Nd	144.27	Nd_2O_3	336.54	1.1664	Tb	158.93	Tb_4O_7	747.72	1.1762
Ni	58.71	Ni_2O_5	165.42	1.4088	Te	127.6	TeO_2	159.60	1.2508
Os	190.2	Os_3O_4	634.6	1.1122	Th	232.04	ThO_2	264.04	1.1379
P	30.97	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	358.05	11.5612	Ti	47.90	TiO_2	79.90	1.6681
					Tl	204.39	Tl_2O_3	456.78	1.1174
Pb	207.21	PbO	223.21	1.0772	Tm	168.94	Tm_2O_3	385.88	1.1421
Pd	106.4	$Pd(NO_3)_2$	230.42	2.1656	U	238.07	U_3O_8	842.21	1.1792
Pr	140.92	Pr_2O_3	329.84	1.1703	V	50.95	V_2O_5	181.90	1.7851
Pt	195.09	金　属	—	—	W	183.86	W_2O_3	415.72	1.1305
Rb	85.48	RbCl	120.93	1.4148	Y	88.91	Y_2O_3	225.82	1.2699
Rh	102.91	金　属	—	—	Yb	173.04	Yb_2O_3	394.08	1.1387
Re	186.22	金　属	—	—	Zn	65.38	ZnO	81.38	1.2447
Ru	101.1	金　属	—	—	Zr	91.22	ZrO_2	123.22	1.3508

表 3-2　标准溶液的配制[1]

元素	基准物质	称取量 m/g	浓度 ρ/(mg·ml⁻¹)	溶剂及用量	稀释剂	容量瓶 V/ml
Ag	高纯金属银	1.000	1	(1+1)$HNO_3$2.5ml	H_2O	1000
	$AgNO_3$(110℃烘干)	1.575	1	0.1mol·L⁻¹HNO_3	0.1mol·L⁻¹HNO_3	1000
Al	高纯金属铝	1.000	1	(1+1)HCl25ml 或(1+1)王水 25ml	1mol·L⁻¹HCl 或(1+2)HCl	1000
	高纯金属铝	1.000	1	(1+3)$HNO_3$30ml	5%HNO_3	1000
	高纯金属铝	1.000	1	10%NaOH25ml (1+1)HCl 中和并过量 10ml	H_2O	1000
	$K_2Al_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$	1.759	1	H_2O 及少许 H_2SO_4	H_2O	1000
As	单体砷	1.000	1	$HNO_3$10ml 或 HCl10ml + $HNO_3$1ml	H_2O	1000
	As_2O_3(110℃烘干)	1.320	1	10%NaOH10ml + H_2O(200～300)ml + (1+1)HCl 中和至微酸性	H_2O	1000
	As_2O_3(110℃烘干)	1.320	1	(1+5)$HNO_3$40ml	H_2O	1000
Au	高纯金属金	1.000	1	王水 10ml+HCl(1～2)ml+H_2O5ml	H_2O	1000
B	H_3BO_3(99.5%以上)	5.717	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	H_3BO_3(99.5%以上)	5.717	1	pH=10 的 NaOH 水溶液 20ml	pH=10 的 NaOH	1000
Ba	$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	1.778	1	煮沸除去 CO_2 的 H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯 $BaCO_3$(110℃烘 2h)	1.437	1	H_2O20ml(1+1)HCl20ml，煮沸除去 CO_2	H_2O	1000
Be	高纯金属铍	1.000	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯 BeO	1.388	1	(1+1)王水 20ml 或 HCl20ml	H_2O	1000
	高纯 BeO	1.388	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml	H_2O	1000
	高纯 $BeCO_3$	7.658	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
Bi	高纯金属铋	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	50mlHNO_3，H_2O	1000
	高纯金属铋	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	100mlHCl，H_2O	1000
	高纯金属铋	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	1+10HNO_3	1000
Ca	高纯 CaO	1.398	1	HCl10ml	H_2O	1000
	高纯 $CaCO_3$(110℃烘干 2h)	2.497	1	H_2O20ml，(1+2)HCl50ml	H_2O	1000
Cd	高纯金属镉	1.000	1	$HNO_3$10ml	H_2O	1000
	高纯金属镉	1.000	1	(1−3)HCl25ml	H_2O	1000

续表

元素	基准物质	称取量 m/g	浓度 ρ/(mg·ml^{-1})	溶剂及用量	稀释剂	容量瓶 V/ml
Ce	高纯 $CeO_2$110℃(烘 2h)	1.228	1	(1+1)HNO_3 和 30%H_2O_2 各 25ml,加热溶解完全,煮沸分解多余的 H_2O_2	H_2O	1000
	高纯 CeO_2(110℃烘 2h)	1.228	1	(1+1)王水 20ml	H_2O	1000
	高纯金属铈	1.000	1	(1+1)王水 20ml	H_2O	1000
Cl	高纯 NaCl[(400～450)℃灼烧至无爆烈声]	1.648	1	H_2O(不含氯根)	H_2O(不含氯根)	1000
Co	高纯金属钴	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	H_2O	1000
	高纯金属钴	1.000	1	(1+1)反王水 20ml①	H_2O	1000
	高纯 $CoSO_4 \cdot 7H_2O$	4.770	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml	H_2O	1000
Cr	高纯金属铬	1.000	1	(1+1)$H_2SO_4$25ml 或(1+1)HCl25ml	H_2O	1000
	高纯金属铬	1.000	1	(1+1)王水 25ml	H_2O	1000
	高纯 K_2CrO_4(105℃烘干 1h)	3.734	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯 $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	7.696	1	H_2O20ml	H_2O	1000
Cu	高纯金属铜	1.000	1	(1+1)$HNO_3$25ml	H_2O	1000
	高纯 CuO	1.252	1	(1+1)$HNO_3$25ml	H_2O	1000
	高纯 $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	3.802	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	3.929	1	H_2O20ml	H_2O	1000
Dy	高纯 Dy_2O_3	1.148	1	(1+1)HCl 或(1+1)$HNO_3$20ml	H_2O	1000
Eu	高纯 Eu_2O_3	1.158	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
F	高纯 NaF(105℃烘干 1h)	2.210	1	H_2O20ml	H_2O	1000 塑料瓶
Fe	高纯铁	1.000	1	(1+1)HNO_3 或(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯还原铁粉	1.000	1	(1+1)HNO_3 或(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯铁或还原铁粉	1.000	1	(1+1)王水或反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 $Fe_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$	8.634	1	$H_2SO_4$5ml,H_2O	H_2O	1000
	高纯 Fe_2O_3	1.430	1	(1+1)HCl25ml	H_2O	1000
	高纯 $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	7.236	1	H_2O	H_2O	1000
	高纯$FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$	7.017	1	$H_2SO_4$5ml,H_2O	H_2O	1000
Ga	高纯金属镓	1.000	1	(1+1)HCl20ml 或(1+1)王水,反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 Ga_2O_3	1.344	1	(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 $GaCl_3$	2.526	1	H_2O	H_2O	1000
Ge	高纯 GeO_2	1.439	1	5gNaOH+50ml H_2O 铂坩埚中	8%酒石酸或(1+1)H_2SO_4 酸化	1000
	高纯金属锗	1.000	1	H_2O_2、NH_4OH 各 20ml,$Na_2CO_3$10g 铂坩埚中	(1+1)H_2SO_4 酸化 H_2O	1000
	高纯 GeO_2	1.439	1	(1+1)反王水 25ml	H_2O	1000
Gd	高纯 Gd_2O_3	1.153	1	(1+1)HCl 或 $HNO_3$20ml	H_2O	1000
Hf	高纯金属铪	1.000	1	(1+1)王水 20ml (1+1)HF20ml	H_2O	1000
	高纯 HfO_2	1.180	1	H_2SO_4+$(NH)_4SO_4$ 水溶液 50ml	H_2O	1000
Hg	高纯 $HgCl_2$	1.354	1	H_2O 或 0.5mol·L$^{-1}H_2SO_4$	H_2O	1000
	高纯金属汞	1.000	1	(1+1)$HNO_3$30ml	H_2O	1000
	高纯 HgO	1.080	1	0.5mol·L$^{-1}H_2SO_4$	H_2O	1000
	高纯 $Hg(NO_2)_2 \cdot 1/2H_2O$	1.663	1	25%$HNO_3$20ml	H_2O	1000
In	高纯金属铟	1.000	1	(1+1)HNO_3 或(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯 In_2O_3	1.209	1	(1+1)HCl 或(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
Ir	高纯$(NH_4)_2IrCl_6$	2.294	1	1mol·L^{-1}HCl50ml	H_2O	1000
	高纯金属铱	1.000	1	K_2SO_4+KNO_3+KOH 铂坩埚中熔融	H_2O	1000

续表

元素	基准物质	称取量 m/g	浓度 $\rho/(mg\cdot ml^{-1})$	溶剂及用量	稀释剂	容量瓶 V/ml
K	高纯 KCl [(400～450)℃烧至质量恒定]	1.907	1	HCl 呈微酸性 H_2O	H_2O	1000
La	高纯金属镧	1.000	1	(1+1)王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 La_2O_3 (850℃灼烧 2h)	1.173	1	(1+1)HCl 或 (1+1)$HNO_3$20ml	H_2O	1000
Li	高纯 LiCl	6.110	1	H_2O	H_2O	1000
	高纯 Li_2CO_3 (110℃烘 2h)	5.324	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml	H_2O	1000
	高纯 Li_2CO_3 (110℃烘 2h)	5.324	1	(1+1)HCl 或 $HNO_3$25ml	H_2O	1000
Mg	高纯金属镁	1.000	1	(1+5) HCl60ml、(1+1) $HNO_3$20ml 或(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 MgO	1.658	1	(1+1)HCl20ml 或(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
Mn	高纯金属锰	1.000	1	(1+1)HCl20ml 或(1+1)$HNO_3$20ml 或(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 $MnSO_4$(500℃灼烧 2h)	2.749	1	H_2O	H_2O	1000
Mo	高纯金属钼	1.000	1	(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 $(NH_4)_6Mo_7O_{24}\cdot 4H_2O$	1.840	1	H_2O 或(1+1)H_2SO_4	H_2O	1000
N	高纯 NH_4Cl (105℃烘干)	3.818	1	H_2O	H_2O	1000
Na	高纯 NaCl(450℃灼烧至质量恒定)	2.542	1	H_2O	H_2O	1000
	高纯 Na_2CO_3 (280℃灼烧 1h)	2.305	1	H_2O50ml,(1+1)HCl 使呈酸性	H_2O	1000
Nb	高纯金属铌	1.000	1	铂皿中(1+1)HNO20ml 及 10mlHF	H_2O	1000
	高纯 Nb_2O_5	1.4305	1	铂皿中、加入 15ml40%HF,少量 HNO_3,低温加热溶解 20min 左右到透明清彻,蒸发至近干(≈0.5ml)加 50ml3%草酸铵提取,移入 1000ml 容量瓶中,水定容移入塑料瓶中贮存	H_2O	1000
Nd	高纯 Nd_2O_5(850℃烧灼 2h)	1.166	1	(1+1)HCl 或 (1+1)王水 20ml	H_2O	1000
Ni	高纯金属镍	1.000	1	(1+1)HNO_3 或(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 $NiSO_4\cdot 7H_2O$	4.784	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml	H_2O	1000
	高纯 NiO	1.273	1	(1+1)HNO_3 或反王水 20ml	H_2O	1000
Os	高纯$(HN_4)_2OsCl_6$	2.311	1	$1mol\cdot L^{-1}$HCl20ml	$1mol\cdot L^{-1}$HCl	1000
P	高纯$(NH_4)_3PO_4\cdot 3H_2O$、	3.976	1	H_2O 20ml	H_2O	1000
	高纯 $Na_2HPO_4$110℃烘 2h	5.045	1	H_2O 20ml	H_2O	1000
	或高纯 $KH_2PO_4$110℃烘 2h	4.394	1	H_2O 20ml	H_2O	1000
Pb	高纯金属铅	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	H_2O	1000
	高纯 $Pb(NO_3)_2$	1.598	1	(1+1)$HNO_2$5ml	H_2O	1000
Pd	高纯金属钯	1.000	1	(1+1)王水 20ml	H_2O	1000
	高纯$(NH_4)_2PdCl_4$	2.675	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
Pr	高纯 Pr_6O_{11} (850℃灼烤 2h)	1.208	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
Pt	高纯金属铂	1.000	1	(1+1)王水 20ml	H_2O	1000
	高纯$(NH_4)_2PtCl_6$	2.275	1	$1mol\cdot L^{-1}$HCl20ml	$1mol\cdot L^{-1}$HCl	1000
Rb	高纯 RbCl (110℃烘 2h)	1.4150		1%HNO_3	H_2O	1000
Re	高纯金属铼	1.000	1	(1+1)王水 20ml	H_2O	1000
	高纯金属铼	1.000	1	50ml(1+1)HCl、滴加 30% H_2O_2,加热使铼分解完全,加热煮沸除去多余的 H_2O_2	H_2O	1000

续表

元素	基准物质	称取量 m/g	浓度 ρ/(mg·ml^{-1})	溶剂及用量	稀释剂	容量瓶 V/ml
Rh	高纯 $RhCl_3$	2.034	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯$(NH_4)_3RhCl_6 \cdot 1\frac{1}{2}H_2O$	3.857	1	6mol·L^{-1}HCl20ml	1mol·L^{-1}HCl	1000
Ru	高纯 $RuCl_3$	2.052	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯$(NH_4)_3RuCl_6$	3.470	1	6mol·L^{-1}HCl20ml	1mol·L^{-1}HCl	1000
Sb	高纯金属锑	1.000	1	(1+1)王水 20ml	(1+1)HCl	1000
	高纯金属锑	1.000	1	3g 酒石酸及(1+1)$HNO_3$30ml	(1+1)HNO_3	100
	高纯金属锑	1.000	1	$H_2SO_4$20ml	(1+10)H_2SO_4	1000
	高纯金属锑	1.000	1	(1+1)反王水 20ml	(1+10)反王水	1000
Se	高纯 SeO_2	1.405	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯金属硒	1.000	1	浓 HNO_3 溶液(在水浴上)	H_2O	1000
Si	高纯 SiO_2(1000℃灼烧并在干燥器内冷却)	2.142	1	铂皿中加 2g$Na_2CO_3$900℃熔融 1h,用水溶解	H_2O	1000 塑料瓶
	高纯 $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$(110℃烘干)	10.119	1	H_2O20ml	H_2O	1000 塑料瓶
	高纯 SiO_2(400 目过筛)(1100℃烘干)	1.412	1	H_2O20ml	H_2O	1000 塑料瓶
Sc	高纯 Sc_2O_3(850℃烧 2h)	1.534	1	(1+1)HCl20ml	(1+1)HCl	1000
Sm	高纯 Sm_2O_3(850℃烧 2h)	1.160	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
Sn	高纯金属锡	1.000	1	(1+1)反王水 20ml	(1+5)反王水	1000
	高纯金属锡	1.000	1	(1+1)HCl50ml(水浴上加热)	(1+5)HCl	1000
	高纯金属锡	1.000	1	$H_2SO_4$20ml	(1+3)H_2SO_4	1000
	高纯金属锡	1.000	1	10g 酒石酸(1+1)HNO_3 30ml 低温溶解	(1+3)HNO_3	1000
	高纯 $SnCl_2 \cdot 2H_2O$	3.801	1	(1+1)HCl20ml	(1+3)HCl	1000
Sr	高纯 $SrCO_3$(110℃2h)	1.685	1	H_2O20ml,(1+1)HCl 或 $HNO_3$20ml 煮沸除去 CO_2	H_2O	1000
	高纯 $SrCl_3 \cdot 6H_2O$	3.043	1	H_2O20ml	H_2O	1000
Ta	高纯金属钽	1.000	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml 及加少量 HNO_3 的 HF10ml (氟塑料器皿)	(1+1)H_2SO_4 或 8% 酒石酸	1000 塑料瓶
	高纯金属钽	1.000	1	(1+1)HF20ml (氟塑料器皿)	H_2O	1000 塑料瓶
	高纯 Ta_2O_5	1.221	1	铂皿中 5g 焦硫酸钾熔融,4% 草酸铵溶液浸出	4%草酸铵	1000
	高纯 Ta_2O_5	1.221	1	铂皿中、5g 焦硫酸钾熔融,熔块用 0.5mol·L^{-1} 的酒石酸溶液浸出	0.5mol·L^{-1}酒石酸溶液	1000
Tb	高纯 Tb_4O_7(850℃2h)	1.176	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
Te	高纯金属碲	1.000	1	(1+1)王水 20ml 及 (1+1)HCl10ml	6mol·L^{-1}HCl	1000
	高纯金属碲	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	H_2O	1000
Tl	高纯金属铊	1.000	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml	H_2O	1000
	高纯金属铊	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	H_2O	1000
	高纯 Tl_2SO_4	1.235	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯 $TlNO_3$	1.304	1	H_2O20ml	H_2O	1000
Tm	高纯 Tm_2O_3(850℃烘 2h)	1.142	1	20ml(1+1)HNO_3 或(1+1)HCl	H_2O	1000
	高纯金属铥	1.000		(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
Ti	高纯金属钛	1.000	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml	(1+8)H_2SO_4	1000 塑料瓶
	高纯金属钛	1.000	1	(1+1)HF10ml (1+1)HCl20ml	(1+1)HCl	1000
	高纯 $K_2TiF_6 \cdot H_2O$	5.389	1	铂皿中(1+1)$H_2SO_4$20ml	(1+8)H_2SO_4	1000 塑料瓶
	高纯 $K_2TiO(C_2O_4)_2 \cdot 2H_2O$	7.394	1	(1+1)$H_2SO_4$20ml	(1+8)H_2SO_4	1000
Th	高纯金属钍	1.000	1	(1+1)HCl 或(1+1)王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 $Th(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	2.379	1	H_2O20ml	H_2O	1000

续表

元素	基准物质	称取量 m/g	浓度 (ρ/mg·ml⁻¹)	溶剂及用量	稀释剂	容量瓶 V/ml
V	高纯金属钒	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml	H_2O	1000
	高纯 NH_4VO_3	2.296	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯 V_2O_5(500℃灼烧)	1.785	1	NaOH 溶液 20ml,H_2SO_4 酸化或(1+1)$HNO_3$50ml	H_2O	1000
U	高纯 $UO_2(NO_3)_2\cdot 6H_2O$	2.109	1	H_2O20ml,HNO_3 酸化	H_2O	1000
	高纯 $UO_2(C_2H_3O_2)\cdot 2H_2O$	1.530	1	H_2O20ml,HNO_3 酸化	H_2O	1000
W	高纯金属钨	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml、HF5ml	H_2O	1000
	高纯 WO_3(850℃灼烧)	1.261	1	5mol·L⁻¹NaOH100ml	H_2O	1000
	高纯 Na_2WO_4	1.598	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯 $Na_2WO_4\cdot 2H_2O$	1.794	1	H_2O20ml	H_2O	1000
Y	高纯 Y_2O_3(850℃2h)	1.270	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯金属钇	1.000	1	(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
Yb	高纯 Yb_2O_3(850℃2h)	1.139	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000
	高纯金属镱	1.000	1	(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
Zn	高纯金属锌	1.000	1	(1+1)HCl20ml 或(1+1)$HNO_3$20ml 或(1+1)反王水 20ml	H_2O	1000
	高纯 $ZnSO_4\cdot 7H_2O$	4.399	1	H_2O20ml	H_2O	1000
	高纯 ZnO	1.245	1	(1+1)HCl 或 $HNO_3$20ml	H_2O	1000
Zr	高纯金属锆	1.000	1	(1+1)$HNO_3$20ml、HF5ml 铂皿中	H_2O	1000
	高纯 ZrO_2	1.3508	1	(1+1)$HNO_3$20ml、HF5ml 铂皿中	H_2O	1000
	高纯 $ZrOCl_2\cdot 8H_2O$	3.533	1	(1+1)HCl20ml	H_2O	1000

① 反王水又称逆王水为 1 份 HCl+3 份 HNO_3。

2. 标样的定值

无论何种来源的标样，都必须用准确的化学分析法或可靠的物理分析法进行标准值的确定，并对标样进行均匀性和稳定性检验。

二、试样的制备

试样的制备就是将取来的试样调制成适合于激发的形式，制备试样的方法要根据试样来源，试样形状，欲分析元素以及其他分析要求来确定，详见表 3-3。

表 3-3 分析要求与试样的形状

分析要求	超微量分析 $w<0.001\%$	微量·少量分析 $w=0.001\%\sim0.1\%$	主成分分析 $w>1\%$
激发光源 / 试料形状	直流电弧	直流、交流电弧、高压火花	高压火花
金属(固体)	溶液	金属	金属
金属(粉末)	溶液、氧化物	压块、氧化物	压块、溶液
氧化物	粉末	粉末、压块	压块、溶液
盐粉末	粉末、溶液	粉末、溶液	粉末、溶液
液　体	溶液	溶液	溶液
有机物	溶液、粉末	溶液、粉末	溶液
备　注	同时使用化学及物理的浓缩方法		

1. 固体试样的制备

固体试样主要是金属和合金，通常制成棒状和块状，根据分析方法的要求，加工成一定的尺寸和形状。

2. 粉末试样的制备

岩石、矿物、土壤、金属盐以及煤灰等环境样品或不能成型的金属等，可以用机械的或化学的方法制成氧化物或盐的粉末。一般使用如图 3-1 所示的各种形状的石墨电极，一般情况下多采用杯形电极 A、B；易飞溅的样品可采用中心圆柱形的电极 C；熔点高的样品，可采用细颈状的电极 D 以及 E。此外有时可与石墨粉等混合加压制成压块作为电极来使用。

3. 溶液试样的制备

金属、合金或无机化合物溶于酸即可配制成溶液，其常用溶剂见表 3-4。试样导入的方法有喷雾法、毛细作用法、机械导入法、蒸发及吸收法，一般使用如图 3-2 所示的各种电极，渗透性大的溶液采用多孔的杯形电极(a)；无机化合物的溶液或粘度高的油状物质使用杯形电极(b)以及旋转电极(c)。

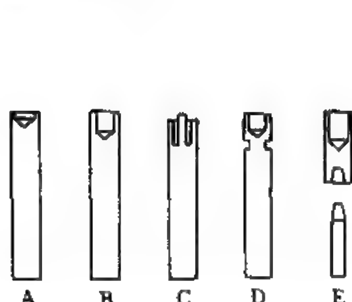


图 3-1 粉末试样使用的各种电极

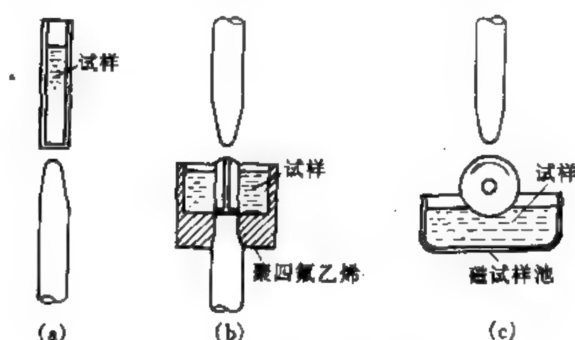


图 3-2 溶液试样使用的电极

4. 有机试样的制备

分析有机试样中所含的金属元素时，通常采用湿灰化分解或干灰化等除去有机物，其残渣制成粉末试样或溶液试样来分析。

表 3-4 常用金属、合金与非金属物质的适宜溶剂[1]

物质	溶剂
Ag	稀热 HNO_3、H_2SO_4、稀 NH_4OH、KCN
Al	稀热 H_2SO_4、HNO_3、HCl、HNO_3+HCl 碱(KOH、NaOH)水溶液、稀王水
Sb	浓 HNO_3、HNO_3+HCl、稀 HNO_3+ 酒石酸、热浓 H_2SO_4、王水
As	HNO_3、热 H_2SO_4、HCl+HNO_3
Au	王水、KCN 溶液、HCl+$H_2Cr_2O_7$ HNO_3+$HClO_4$、热 H_2SO_4
B	浓 HNO_3、浓 H_2SO_4、浓碱
Ba	酸、水、醇
Be	冷 H_2SO_4、HCl、热 HNO_3、碱 HCl+HNO_3、稀酸
Bi	稀 HNO_3、浓 HCl、热 H_2SO_4、HCl+ HNO_3、王水
Ca	稀酸、水、醇、液氨
Cd	稀 HNO_3、热 HCl、HCl+HNO_3 NH_4NO_3、热 H_2SO_4
Ce	稀 HCl、HNO_3、HCl+HNO_3
Co	HNO_3、HCl+HNO_3、H_2SO_4
Cr	稀 HCl、H_2SO_4、HCl+HNO_3 $HClO_4$
Cs	酸、醇、液氨
Cu	HNO_3+HCl、HNO_3+H_3PO_4 热 HNO_3、热 H_2SO_4、NH_4OH HNO_3+H_2SO_4
Fe	稀热 HNO_3、稀 HCl+HNO_3 浓 H_2SO_4、HCl
Ga	HCl、HCl+HNO_3、KOH、NaOH NH_4OH、
Gd	HCl、HNO_3、HCl+HNO_3
Ge	HCl+HNO_3、Na_2CO_3+HN_4OH +H_2O_2、热 H_2SO_4、王水
Hf	王水+HF、HNO_3+HF、浓 H_2SO_4、HF、碱熔
Hg	HNO_3、热 H_2SO_4
Ho	稀酸
In	热 HNO_3、HCl、H_2SO_4、HBr HCl−HNO_3 酸
Ir	K_2SO_4+KNO_3+KOH 混合物 熔融、轻微溶于王水、不溶于碱
K	醇、液氨、苯胺、酸、汞
La	王水、无机酸、不溶于浓 H_2SO_4
Li	酸、液氨
Mg	稀 HCl、HNO_3、HCl+HNO_3 醋酸、氨盐溶液、浓 HF、无机酸
Mn	稀 HCl、HNO_3、HCl+HNO_3 热 H_2SO_4、稀酸
Mo	稀热 H_2SO_4、热浓 HNO_3、HCl+ HHO_3、碱熔、王水、热浓 H_2SO_4
Na	NH_4OH
Nb	热 H_2SO_4、HF、碱熔
Nd	酸
Ni	稀 HNO_3、微溶 HCl、HCl+HNO_3 微溶 H_2SO_4、HNO_3+H_2SO_4

续表

物质	溶剂
Os	HCl、浓 HNO_3、$HCl+HNO_3$ 热 H_2SO_4
P	氯仿、CS_2、醇、醚
Pb	稀 HNO_3、热浓 H_2SO_4、HCl 醋酸
Pd	王水、浓 HNO_3、热 H_2SO_4 碱熔
Pt	王水、碱熔
Rb	酸、醇
Re	王水、稀 HNO_3、微溶 H_2SO_4、H_2O_2
Rh	熔融硫酸氢钾、铑黑可溶于王水、浓 H_2SO_4、H_2SO_4+HCl
Ru	Na_2O_2、碱熔
S	醇、醚、苯、CS_2、CCl_4
Sb	浓 H_2SO_4、$HCl+HNO_3$、HNO_3+酒石酸
Sc	稀酸
Se	浓 H_2SO_4、$HCl+HNO_3$、微溶 CS_2 HNO_3、碱、$CHCl_3$
Si	HNO_3+HF、碱+HF、碱熔
Sm	酸
Sn	HCl、H_2SO_4、$HCl+HNO_3$ 稀 HNO_3、碱、王水
Sr	酸、醇、液氨
Ta	HF、碱熔、HNO_3+HF
Te	HNO_3、H_2SO_4、$HCl+HNO_3$ KOH、KCN、王水
Th	HCl、HF、H_2SO_4、王水、$HCl+HNO_3$
Ti	HNO_3、HCl、$HCl+HNO_3$、HF H_2SO_4+HF、HNO_3+HF、碱熔
Tl	HNO_3、H_2SO_4、浓 HCl、王水
Tm	稀酸
U	稀酸、Na_2CO_3、K_2CO_3
V	HNO_3、H_2SO_4、HF、王水
W	浓 HNO_3、HNO_3+HF、王水 碱熔、$NaOH+NaNO_3$ 熔融
Y	浓 H_2SO_4、王水、碱熔、稀酸
Yb	稀酸、王水、液氨、酸
Zn	HNO_3、HCl、$HCl+HNO_3$、乙酸、稀 H_2SO_4、碱、$HCl+H_2O_2$
Zr	王水+HF、HNO_3+HF、热 H_3PO_4、碱熔
黄铜	HNO_3、HNO_3+HCl $HCl+H_2O_2$、$HNO_3+H_3PO_4$、HNO_3+酒石酸
锡青铜 QSn	$HCl+HNO_3$、$HCl+H_2O_2$、HNO_3+酒石酸、$HNO_3+H_2SO_4$
铝青铜 QAl	HNO_3、$HCl+H_2O_2$、$HNO_3+H_2SO_4$
铍青铜 QBe	HNO_3、HNO_3+HF、$HCl+HNO_3$ $HNO_3+H_2SO_4$
硅青铜 QSi	HNO_3+HF、$HNO_2+HF+H_3PO_4$ HNO_3+HCl
镉青铜 QCd	HNO_3、$HCl+H_2O_2$
铬青铜 QCr	$HNO_3+H_2SO_4-H_3PO_4$、HNO_3+HClO_4、$HNO_3+H_2SO_4$
锰青铜 QMn	$HNO_3+H_3PO_4$、$HCl+H_2O_2$、HNO_3、HNO_3+HCl、$HNO_3+H_2SO_4$
锆青铜 QZr	$HCl+H_2O_2$、HNO_3、HNO_3+HCl $HNO_3+H_2SO_4$
白铜	HNO_3、HNO_3+HCl、HNO_3+HF $HNO_3+H_3PO_4$、HNO_3+酒石酸 $HCl+H_2O_2$
镍合金	HNO_3、$HCl+HNO_3$、$H_2SO_4+H_2O_2$ $HNO_3+H_3PO_4$、$HNO_3+H_2O_2$ $HNO_3+HCl+H_3PO_4$、$HNO_3+H_2SO_4$
Cu-Mg	HNO_3
Cu-P	$HCl-HNO_3$
Cu-Mn	$HNO_3+H_3PO_4$
Cu-Cr	HNO_3+HClO_4
Cu-Ti	$HNO_3+H_2SO_4$、$HCl+H_2O_2$
Ni-Be	$HNO_3+H_2SO_4$
Ni－Cd	HNO_3
Al 合金	$HCl+HNO_3$、HCl、$HCl+H_2O_2$
Al-Fe	$HCl+H_2O_2$
Al-Sn	$HCl+H_2O_2$
Al-Mo	王水、$HNO_3+H_2SO_4$
Al-V	$HNO_3+H_2SO_4$
镍铬合金	$HCl+HNO_3$
康铜	HNO_3
铁合金	$HCl+HNO_3$
普钢	HCl、稀 H_2SO_4
生铁	HNO_3、热浓 H_2SO_4、王水、$HClO_4$
高合金钢	HNO_3、王水、$HClO_4$、热浓 H_2SO_4
银合金	HNO_3
银焊料	HNO_3、$HNO_3+H_3PO_4$、HNO_3+HF
锡铅焊料	H_2SO_4、H_2SO_4、+HCl、HBr、HCl+HBr、王水
Sn-Zn-Al-Cd 焊料	HCl、$HCl+HBr+HClO_4$、$HCl+H_2SO_4$、$HBr+HClO_4$

三、进样技术

发射光谱分析的进样技术，随激发光源的不同而不同，同一光源也可以有不同的进样方式。

1. 自电极法

用电弧、火花进行光谱分析时，都必须使用电极。金属和合金试样，可以直接用作电极。以试样直接作为电极的方法，称为自电极法。自电极法是金属分析常用的进样方法。

2. 直立电极法

电弧、火花光源常采用直立电极进样法，其中包括装样法、压片法、熔珠法、干渣法和金属自电极法等。装样法是将粉末试样填装在电极孔穴中送入光源，是一种最通用的方法。压

片法是将粉末试样压成小片后放入电极孔穴中，送入光源。熔珠法是将电极孔穴中的片样熔成珠球，再进行蒸发激发。干渣法是将试液直接滴在电极上蒸干，或将它们的干渣放入电极孔穴中，然后送进光源激发。

3. 水平电极法

水平电极的进样方式，包括装样法、纸条法、撒样法和吹样法。装样法采用具有相同形状的两个水平电极，装入相同的试样，用交流电弧激发。纸条法是将无灰滤纸裁成纸条，用饱和硫酸铵溶液浸泡，干燥后涂上适当的粘附剂，将粉末试样均匀铺于其上，然后把纸条折叠（粉末层向内）粘住，送入水平电弧的弧焰中心，进行蒸发激发。撒样法是将试样自上而下地均匀撒入水平电极的间隙中，以交流电弧进行蒸发激发。吹样法是在水平交流弧光的下方，用特殊的吹样管把粉末试样自下而上吹入等离子区，使试样获得蒸发和激发。

4. 溶液进样法

（1）干渣法　将试液滴在平头电极上，烘干后电极头上便形成一层薄干层，然后用交流电弧或火花激发电极上的干渣。

（2）碳粉吸附法　用一定量的碳粉吸收试液，低温烘干，混匀，装人碳电极小孔中激发。

（3）直接引入法　根据毛细现象设计的U形管进样装置或环形电极，当电极放电时，试液便从电极槽中通过电极头的小孔进人放电间隙。也可采用转盘电极，试液被转盘电极外缘不断带人放电间隙。此外，还可借喷雾装置将试液喷入水平交流电弧中。

（4）转化为粉末法　将试液经化学处理转化为沉淀，将沉淀与缓冲剂混合后装人电极孔穴中进行激发。

5. 溶液气溶胶进样法

溶液气溶胶进样技术有气动雾化和超声雾化法两种，前者最常用，是ICP光源常规的进样技术。在商品雾化器中，玻璃同心型气动雾化器和直角型气动雾化器是最常用的两种。超声波雾化器是以超声波的声能作为雾化的动力。无论气动雾化或超声雾化，均采用“预混合”方式，即雾化器所产生的气溶胶是先进人雾化室，然后再输送进人等离子体中。

6. 挥发性氢化物进样技术

生成挥发性氢化物的进样技术，在ICP光谱法中应用较多，并有商品仪器出售。这种方法可用于测定As、Sb、Bi、Ge、Sn、Pb、Se、Te和Hg9种元素。前8种元素在还原剂作用下，生成易挥发的氢化物，汞盐被还原为金属汞而挥发。用载气把生成的气态氢化物或汞蒸气带入ICP进行分析。

7. 电热蒸发进样技术（ETV）

ETV以电热蒸发系统代替气动雾化器作为ICP的进样系统，使样品的传输效率提高，检出限降低。ETV与ICP联用是将试样置于石墨蒸发器上，通大电流加热，将试样变成气态，并被载气送入ICP激发源。石墨蒸发器有丝状[2]，棒状[3~8]、杯状[9~13]和炉状[14~19]。可用ETV-ICP系统进行多元素同时测定[20]，分析合金钢、碳化硅、淤泥、土壤以及灰中的痕量元素，也可用ETV-ICP系统分析生物样品中的Cr、B、Mo和V等[21]。

8. 流动注射进样技术（FI）

FI以其具有微量、密闭、重现、快速等优点，已在ICP中得到了比较广泛的应用，它和原子光谱分析相结合产生了许多新的进样技术，如在线预浓集，在线稀释，在线分离萃取和梯度校正等。用FI-ICP在线分析钢铁中B时，流动注射系统有效地消除了基体Fe对B灵敏线的光谱干扰。用活性炭作吸附剂，硝酸作淋洗液，用FI-ICP可对雨水、海水等样品中的多

元素进行同时测定[21,23]。

9. 其他进样技术

目前，用火花源作为ICP的固体样品进样系统已商品化。美国 Thermo Jarrell Ash 公司推出的ICP61E多道等离子体发射光谱仪就装备有火花固体样品进样器，可直接测量液体和固体样品。

用连续激光蒸发技术作为ICP的固体样品进样系统，可定量分析地质样品中的微量 Ba 和 Sr[24]。激光蒸发技术避免了化学处理地质难溶样品时的困难，同时也减少了试剂对空白的污染。

此外在进样方法方面，直接注射雾化器[25]和射流超声雾化器[26]的研究结果也很有意义。

第二节　摄谱技术

摄谱法是发射光谱普遍使用的方法，因此掌握摄谱技术十分重要。

一、感光板的性能及基本类型

摄谱法需用感光板来接收、记录光源发射的光谱，常用感光板的型号及性能见表3-5。

表3-5　国产天津感光板①

型号	灵敏度 ($SD_0+0.2$)	反衬度	灰雾	感光范围 nm	特点与用途
紫外Ⅰ型	12±3	3.0±0.2	<0.06	250～500	特细粒度，适用于定量分析
紫外Ⅱ型	20±5	2.0±0.2	<0.06	250～500	较细粒度，适用于定性分析，也可作定量分析
紫外Ⅲ型	20±5	2.8±0.2	<0.06	230～500	细粒度，适用于定量分析
蓝快型	40±15	1.0±0.2	<0.08	250～500	较粗粒度，适用于定性分析
蓝硬型	20±5	2.0±0.2	<0.06	250～500	同紫外Ⅱ型
蓝特硬型	12±3	2.8±0.8	<0.06	250～500	同紫外Ⅰ型
蓝超硬型	1～2	4.0±0.5	<0.06	250～500	极细粒度，适用于定量分析
黄快型	45±15	1.0±0.2	<0.08	300～600	适用于定性分析
黄特硬型	13±5	2.5±2	<0.08	300～600	适用于定量分析
红快型	50±20	1.0±0.2	<0.08	300～700	适用于定性分析
红特硬型	13±5	2.5±0.2	<0.08	300～700	适用于定量分析

① 规格：9cm×12cm，9cm×24cm，18cm×24cm。

二、感光板的化学处理

感光板经曝光后，需要进行显影、定影、水洗和干燥，才能获得清晰的谱片。这个过程，称作化学处理或暗室处理。

1. 显影

显影过程是在显影液中进行，显影液的成分包含显影剂（米吐尔、对苯二酚等）、加速剂（Na_2CO_3、K_2CO_3、硼砂等）、保护剂（主要是亚硫酸钠）、抑制剂（KBr、NaBr等）。常用显影液的配方见表3-6。

表3-6　各种显影液配方[27]①

成分 / 编号	米吐尔 m/g	亚硫酸钠 m/g	对苯二酚 m/g	碳酸钠 m/g	溴化钾 m/g	菲尼酮 m/g	苯并三氮唑 m/g	使用稀释	特性	时间/温度	备注
通用	1	26	5	20	1						亦即国产板配方
D_8		90	45	NaOH 38	30			1∶1	低温强反差	2min/20℃	

续表

成分 / 编号	米吐尔 m/g	亚硫酸钠 m/g	对苯二酚 m/g	碳酸钠 m/g	溴化钾 m/g	菲尼酮 m/g	苯并三氮唑 m/g	使用稀释	特性	时间/温度	备注
D_{11}(a)		85	5	硼酸 2					中反差		
D_{11}(b)	1	75	9	25	5				强反差	3min/21℃	
D_{19}	2	90	8	48	5				反差大		
D_{75}	2	100	5	硼砂 2					一般	15min/20℃	
D_{72}(a)		42	12	67.5	1.9	0.25		1∶1	中反差		
D_{72}(b)	3.1	45	12	67.5	1.9				中反差	(3～4)min/20℃	
$Agfa_{55}$	15	75							高　温	(8～10)min/30℃	加 Na_2SO_4 50g
DK_{15}	6	90			2				高　温		Na_2SO_4 45g 偏磷酸钠 22.5g
	16	100		60	2	加 20% KCNS 5ml	10% 10ml		高温	7min/28℃	
	2	20	2	16	10% 35ml				高温	(2～4)min/38℃	
东方红 35-1	1.5	25	6	25	4						
	1.5	15	1.5	12	3	加 Na_2SO_4 30				(2～4)min/38℃	
	1.3	34		65					低温		5℃显影加 30%NaOH35ml 10℃显影加 30%NaOH20ml
		50	12	60	2	0.5	0.2	1∶1～1∶7	快速		
	3	40	1	硼砂 10					匀调反差小	20min/20℃	
Ⅱ-1	2	20	6	25	3				一般		
Ⅱ-2	2	25	4	18	2.5				一般		
SD_2	2	25	6	25	2				一般		
G_{251}	1.5	25	6	40	1				一般		
ID_{62}		50	12	60	2	0.05	0.2		一般		
ID_{14}	1.5	20	12.5	37	2				硬		
ϕ_2	4.8	60	14.4	21	2				硬		
D_8		90	45	NaOH 37.5	30				硬		
$Agfa_{16}$	6	100		12	3				硬		
FD_{131}	1	75	9	29	6						
FD_{111}	4	60	10	53	2.5						
Никфи-1	5	75		硼砂 12					一般	(10～15)min/20℃	硼酸 4g
$Agfa_{17}$	1.5	80	3		0.5				一般	(10～15)min/20℃	偏硼酸钠 2g
DK_{20}	5	100			0.5				一般	(14～16)min/20℃	偏硼酸钠 2g 硫氰化钠 1g

① 配制 1000ml 显影液的配方。

2. 定影

定影过程是在定影液中进行。定影液的成分包含定影剂(海波、硫代硫酸铵等)、中和剂(乙酸、硼酸等)、保护剂(亚硫酸钠)、坚膜剂(明矾、甲醛等)。常用定影液的配方见表 3-7。

表 3-7　各种定影液配方[27]①

药品 / 种类	水 V/ml	海波② m/g	无水 Na_2SO_3 m/g	乙酸(28%) V/ml	硼酸(结晶) m/g	明矾③	$(NH_4)_2S_2O_3$ m/g	$AlCl_3 \cdot 6H_2O$ m/g	稀释体积 V/ml
柯达 F-5	600 (50℃)	(1) 240	(2) 15	(3) 48	(4) 7.5	(5) 15			1000
柯达快速定影液 F-7	600 (50℃)	(1) 360	(3) 15	(4) 48	(5) 7.5	(6) 15	(2) NH_4Cl 50		1000

续表

药品 种类	水 V/ml	海波[②] m/g	无水 Na_2SO_3 m/g	乙酸 (28%) V/ml	硼酸（结晶） m/g	明矾[③]	$(NH_4)_2S_2O_3$ m/g	$AlCl_3 \cdot 6H_2O$ m/g	稀释体积 V/ml
硫代硫酸铵快速定影液 ATF-1	700		(2) 12	冰醋酸 (3) 9	(4) 7.5		(60%) (1) 185	(5) 12.5	1000
ATF-5（比 ATF-1 快）	700		(2) 15	(3) 55	(4) 7.5	(5) 15	（无水） (1) 200		1000
FF-H4	600	(1) 300	(2) 15	冰醋酸 (3) 12	(4) 12	(5) 20			1000

① 表中(1)、(2)、(3)……为药品加入次序。

② 海波是 $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ 的俗名。

③ 明矾分子式为 $K_2Al_2(SO_4)_4 \cdot 24H_2O$。

三、乳剂特性曲线的绘制

在光谱定量分析中，感光板的作用在于把接受到的一定曝光量 H 转换成感光层的黑度 S，但 S 和 H 之间的关系是比较复杂的，不能用一个简单的数学公式完全表达出来，因此常用黑度为纵坐标，曝光量的对数为横坐标绘制乳剂特性曲线来表示两者之间的关系。乳剂特性曲线直线部分的关系式为

$$S = r\lg H - i \tag{3-1}$$

式中，r 为乳剂的反衬度；i 为常数。通过乳剂特性曲线，可以了解感光板的性能，计算谱线的强度，校正光谱背景等。光谱分析时，主要是利用乳剂特性曲线的直线部分进行计算，此时 S 正比于 $\lg H$。但当对低含量元素进行分析时，S 落于乳剂特性曲线的曝光不足部分，此时曲线发生弯曲。因此，常选用一个类似于黑度 S 的函数来代替 S，这种函数称为换值黑度 W。当采用 W 对 $\lg H$ 作图时，其乳剂特性曲线的直线范围可延伸至曝光不足部分。如果选用一个与 S 及 W 相似，且与 $\lg H$ 成线性关系的函数 P 作为换值黑度，则在低含量部分后者的线性较前两者为好。因此，在进行低含量光谱定量分析时，常采用 P 标尺进行测光。表 3-8 为换值黑度 W，表 3-9 为换值黑度 P。

乳剂特性曲线的绘制方法很多，常用的有谱线组法，减光板法和扇形板法。

1. 谱线组法

在一定的实验条件下，元素的同一多重线组中的各谱线具有确定的相对强度，测定这一组不同相对强度的谱线，得到一系列不同的黑度，以这些谱线的相对强度 I 的对数为横坐标，黑度 S 为纵坐标作图，可以绘制乳剂特性曲线。表 3-10 给出了常用的铁谱线组及其相对强度。前两组适用于直流电弧和大型摄谱仪，第三组应用的最多，它广泛用于直流电弧、交流电弧、高压火花以及大、中型摄谱仪。第四组的谱线数目较多，对作乳剂特性曲线极为有利。

2. 减光板法

同一谱线经阶梯减光板后，可获得一系列不同强度 I_i

$$I_i = P_i I_0 \tag{3-2}$$

式中，P_i 为减光板某一阶梯的透光率；I_0 为谱线未减弱时的强度。把 (3-2) 式代入 $S = r\lg I - i'$，可得黑度阶为

$$S_i = r\lg P_i + r\lg I_0 - i' = r\lg P_i - i'' \tag{3-3}$$

式中，i''为一常数。用阶梯减光板摄谱后，测出某一谱线各阶梯的黑度 S_i，然后查出各阶梯的

透光率 P_i，即可绘出 S-lg$P$ 乳剂特性曲线。表 3-11 为阶梯减光板数据。

3. 扇形板法

旋转扇形板的不同阶梯的曝光时间是不同的，因而谱线在不同阶梯的积分强度不同，即谱线的不同阶梯的黑度也不同。根据

$$S=rP\lg t-i'' \quad (3\text{-}4)$$

式中，P 为施瓦奇尔德系数；t 为曝光时间；i''为常数。以黑度 S 为纵坐标，以时间 t 为横坐标，即可绘制 S-lg$t$ 乳剂特性曲线。表 3-12 为阶梯扇形板数据。

表 3-8 换值黑度 W[28]

S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.99	943	944	945	946	948	949	950	951	952	953
0.98	932	933	934	935	936	938	939	940	941	942
0.97	921	922	923	924	925	926	927	928	930	931
0.96	910	911	912	913	914	915	916	917	919	920
0.95	898	899	901	902	903	904	905	906	907	909
0.94	887	888	889	890	892	893	894	895	896	897
0.93	876	877	878	879	880	881	883	884	885	886
0.92	864	866	867	868	869	870	871	872	873	875
0.91	853	854	855	856	858	859	860	861	862	863
0.90	842	843	844	845	846	847	848	850	851	852
0.89	830	831	832	834	835	836	837	838	839	840
0.88	819	820	821	822	823	824	825	827	828	829
0.87	807	808	809	811	812	813	814	815	816	818
0.86	796	797	798	799	800	801	802	804	805	806
0.85	784	785	786	787	789	790	791	792	793	794
0.84	772	773	775	776	777	778	779	780	782	783
0.83	760	762	763	764	765	766	768	769	770	771
0.82	749	750	751	752	753	755	756	757	758	759
0.81	737	738	739	741	742	743	744	745	746	748
0.80	725	726	727	729	730	731	732	733	735	736
0.79	713	714	716	717	718	719	720	721	723	724
0.78	701	702	704	705	706	707	708	710	711	712
0.77	689	690	692	693	694	695	696	698	699	700
0.76	677	678	680	681	682	683	684	686	687	688
0.75	665	666	667	669	670	671	672	674	675	676
0.74	653	654	655	656	658	659	660	661	663	664
0.73	641	642	643	644	645	647	648	649	650	652
0.72	628	629	631	632	633	634	636	637	638	639
0.71	616	617	618	620	621	622	623	625	626	627
0.70	603	605	606	607	608	610	611	612	613	615
0.69	591	592	593	595	596	597	598	600	601	602
0.68	578	580	581	582	583	585	586	587	588	590
0.67	566	567	568	569	571	572	573	574	576	577
0.66	553	554	555	557	558	559	561	562	563	564
0.65	540	541	543	544	545	546	548	549	550	552
0.64	527	528	530	531	532	534	535	536	537	539
0.63	514	515	517	518	519	521	522	523	524	526
0.62	501	502	504	505	506	508	509	510	511	513
0.61	488	489	490	492	493	494	496	497	498	500
0.60	474	476	477	478	480	481	482	484	485	486
0.59	461	462	464	465	466	468	469	470	472	473
0.58	447	449	450	452	453	454	456	457	458	460
0.57	434	435	437	438	439	441	442	443	445	446
0.56	420	421	423	424	426	427	428	430	431	432
0.55	406	408	409	410	412	413	413	416	417	419
0.54	392	394	395	396	398	399	401	402	403	405
0.53	378	380	381	382	384	385	387	388	389	391
0.52	364	365	367	368	370	371	372	374	375	377
0.51	349	351	352	354	355	357	358	360	361	362
0.50	335	336	338	339	341	342	344	345	347	348
0.49	320	322	323	325	326	328	329	331	332	333
0.48	305	307	308	310	311	313	314	316	317	319
0.47	290	292	293	295	296	298	299	301	302	304
0.46	275	277	278	280	281	283	284	286	287	289
0.45	260	261	263	264	266	267	269	270	272	274

续表

S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.44	244	246	247	249	250	252	253	255	257	258
0.43	228	230	231	233	235	236	238	239	241	243
0.42	212	214	215	217	219	220	222	224	225	227
0.41	196	198	199	201	203	204	206	207	209	211
0.40	180	181	183	184	186	188	189	191	193	194
0.39	163	164	166	168	170	171	173	175	176	178
0.38	146	147	149	151	153	154	156	158	159	161
0.37	128	130	132	134	135	137	139	141	142	144
0.36	111	113	114	116	118	120	121	123	125	127
0.35	093	095	097	098	100	102	104	106	107	109
0.34	075	077	078	080	082	084	086	088	089	091
0.33	056	058	060	062	064	065	067	069	071	073
0.32	037	039	041	043	045	047	049	050	052	054
0.31	018	020	022	024	026	027	029	031	033	035
0.30	−002	000	002	004	006	008	010	012	014	016
0.29	−022	−020	−018	−016	−014	−012	−010	−008	−006	−004
0.28	−043	−041	−039	−037	−035	−033	−031	−029	−026	−024
0.27	−064	−062	−060	−058	−056	−054	−052	−049	−047	−045
0.26	−086	−084	−082	−080	−078	−075	−073	−071	−069	−066
0.25	−109	−107	−104	−102	−100	−098	−095	−093	−091	−089
0.24	−132	−130	−127	−125	−123	−120	−118	−116	−113	−111
0.23	−156	−154	−151	−149	−146	−144	−142	−139	−137	−134
0.22	−181	−178	−176	−173	−171	−168	−166	−163	−161	−158
0.21	−206	−204	−201	−199	−196	−193	−191	−188	−186	−183
0.20	−233	−230	−228	−225	−222	−220	−217	−214	−212	−209
0.19	−261	−258	−255	−252	−249	−247	−244	−241	−238	−236
0.18	−289	−286	−284	−281	−278	−275	−272	−269	−266	−263
0.17	−320	−316	−313	−310	−307	−304	−301	−298	−295	−292
0.16	−351	−348	−345	−342	−338	−335	−332	−329	−326	−323
0.15	−384	−381	−378	−374	−371	−368	−364	−361	−358	−354
0.14	−420	−416	−413	−409	−405	−402	−398	−395	−391	−388
0.13	−457	−453	−450	−446	−442	−438	−434	−431	−427	−423
0.12	−497	−493	−489	−485	−481	−477	−473	−469	−465	−461
0.11	−540	−536	−531	−527	−523	−518	−514	−510	−506	−501
0.10	−587	−582	−577	−572	−568	−563	−558	−554	−549	−545
0.09	−638	−632	−627	−622	−617	−612	−607	−602	−597	−592
0.08	−694	−688	−682	−677	−671	−665	−660	−654	−649	−643
0.07	−757	−751	−744	−737	−731	−725	−718	−712	−706	−700
0.06	−829	−822	−814	−807	−799	−792	−785	−778	−771	−764
0.05	−914	−904	−896	−887	−878	−870	−861	−853	−845	−837
0.04	−1016	−1004	−993	−983	−972	−962	−952	−942	−932	−923
0.03	−1146	−1131	−1117	−1103	−1089	−1076	−1063	−1051	−1039	−1027
0.02	−1327	−1305	−1284	−1264	−1245	−1227	−1210	−1193	−1177	−1161
0.01	−1633	−1591	−1553	−1517	−1485	−1454	−1426	−1399	−1373	−1350
0.00	−∞	−2637	−2336	−2159	−2033	−1936	−1857	−1789	−1731	−1679

S	W	S	W	S	W	S	W
1.000	0.954	1.20	1.172	1.40	1.382	1.70	1.691
1.10	1.064	1.30	1.278	1.50	1.486	2.00	2.000

注：表 3 8 中 0～9 栏的数据在使用时需$\times 10^{-3}$。

表 3-9 换值黑度 P

S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.99	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976
0.98	956	957	958	959	960	962	963	964	965	966
0.97	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955
0.96	935	936	937	938	939	940	941	942	944	945
0.95	924	925	927	928	929	930	931	932	933	934
0.94	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923
0.93	903	904	905	906	907	908	910	911	912	913
0.92	892	894	895	896	897	898	899	900	901	902
0.91	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891
0.90	871	872	873	874	875	876	877	879	880	881
0.89	860	861	862	864	865	866	867	868	869	870
0.88	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859
0.87	839	840	841	842	843	844	845	846	847	849
0.86	828	829	830	831	832	833	834	836	837	838
0.85	817	818	819	820	822	823	824	825	826	827

续表

S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.84	806	807	809	810	811	812	813	814	815	816
0.83	795	797	798	799	800	801	802	803	804	805
0.82	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794
0.81	774	775	776	777	778	779	780	781	782	784
0.80	763	764	764	766	767	768	769	770	772	773
0.79	752	753	754	755	756	757	758	759	761	762
0.78	741	742	743	744	745	746	747	749	750	751
0.77	730	731	732	733	734	735	736	737	739	740
0.76	719	720	721	722	723	724	725	727	728	729
0.75	708	709	710	711	712	713	714	715	717	718
0.74	697	698	699	700	701	702	703	704	706	707
0.73	685	687	688	689	690	691	692	693	694	696
0.72	674	675	677	678	679	680	681	682	683	684
0.71	663	664	665	666	668	669	670	671	672	673
0.70	652	653	654	655	656	658	659	660	661	662
0.69	641	642	643	644	645	646	647	649	650	651
0.68	629	630	632	633	634	635	636	637	638	640
0.67	618	619	620	621	623	624	625	626	627	628
0.66	607	608	609	610	611	612	613	615	616	617
0.65	595	596	598	599	600	601	602	603	604	606
0.64	584	585	586	587	588	589	591	592	593	594
0.63	572	573	575	576	577	578	579	580	581	583
0.62	560	562	563	564	565	566	568	569	570	571
0.61	549	550	551	553	554	555	556	557	558	560
0.60	537	539	540	541	542	543	544	546	547	543
0.59	526	527	528	529	530	532	533	534	535	536
0.58	514	515	516	518	519	520	521	522	523	525
0.57	502	503	505	506	507	508	509	510	512	513
0.56	490	491	493	494	495	496	497	499	500	501
0.55	478	480	481	482	483	484	486	487	488	489
0.54	466	468	469	470	471	472	474	475	476	477
0.53	454	456	457	458	459	460	462	463	464	465
0.52	442	443	445	446	447	448	449	451	452	453
0.51	430	431	432	434	435	436	437	439	440	441
0.50	418	419	420	421	423	424	425	426	428	429
0.49	405	407	408	409	410	412	413	414	415	416
0.48	393	394	395	397	398	399	400	402	403	404
0.47	380	382	383	384	385	387	388	389	390	392
0.46	368	369	370	372	373	374	375	377	378	379
0.45	355	356	358	359	360	361	363	364	365	367
0.44	342	344	345	346	347	349	350	351	353	354
0.43	329	331	332	333	335	336	337	338	340	341
0.42	316	318	319	320	322	323	324	326	327	328
0.41	303	305	306	307	309	310	311	312	314	315
0.40	290	291	293	294	295	297	298	299	301	302
0.39	277	278	279	281	282	283	285	286	287	289
0.38	263	264	266	267	269	270	271	273	274	275
0.37	249	251	252	254	255	256	258	259	260	262
0.36	236	237	238	240	241	243	244	245	247	248
0.35	222	223	225	226	227	229	230	232	233	234
0.34	208	209	210	212	213	215	216	218	219	220
0.33	193	195	196	198	199	200	202	203	205	206
0.32	179	180	182	183	185	186	188	189	190	192
0.31	164	166	167	169	170	171	173	174	176	177
0.30	149	151	152	154	155	157	158	160	161	163
0.29	134	136	137	139	140	142	143	145	146	147
0.28	119	120	122	123	125	126	128	129	131	133
0.27	103	105	106	108	109	111	112	114	115	117
0.26	087	089	090	092	093	095	097	098	100	101
0.25	071	072	074	076	077	079	081	082	084	085
0.24	054	056	058	059	061	063	064	066	068	069
0.23	037	039	041	042	044	046	047	049	051	053
0.22	020	022	023	025	027	029	030	032	034	036
0.21	002	004	006	007	009	011	013	015	016	018
0.20	−017	−015	−013	−011	−009	−007	−006	−004	−002	−000
0.19	−036	−034	−032	−030	−028	−026	−024	−022	−020	−019
0.18	−055	−053	−051	−049	−047	−045	−043	−041	−039	−037
0.17	−075	−073	−071	−069	−067	−065	−063	−061	−059	−057

续表

S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.16	−096	−094	−092	−090	−087	−085	−083	−081	−079	−077
0.15	−118	−115	−113	−111	−109	−107	−104	−102	−100	−098
0.14	−140	−138	−136	−133	−131	−129	−126	−124	−122	−120
0.13	−164	−161	−159	−157	−154	−152	−149	−147	−145	−142
0.12	−189	−186	−184	−181	−179	−176	−174	−171	−169	−166
0.11	−215	−213	−210	−207	−205	−202	−199	−197	−194	−191
0.10	−244	−241	−238	−235	−232	−229	−226	−224	−221	−218
0.09	−274	−271	−268	−265	−262	−259	−256	−253	−250	−247
0.08	−307	−304	−300	−297	−294	−290	−287	−284	−281	−277
0.07	−344	−340	−336	−332	−329	−325	−321	−318	−314	−311
0.06	−385	−381	−376	−372	−368	−364	−360	−356	−352	−348
0.05	−432	−427	−422	−417	−412	−408	−403	−398	−394	−389
0.04	−488	−482	−476	−470	−464	−459	−453	−448	−442	−437
0.03	−558	−550	−543	−535	−528	−521	−514	−507	−501	−494
0.02	−654	−642	−631	−621	−611	−601	−592	−583	−575	−566
0.01	−812	−790	−771	−752	−736	−720	−705	−691	−678	−666
0.00	−∞	−1318	−1167	−1078	−1014	−966	−925	−891	−862	−835

S	P	S	P	S	P
1.000	0.977	1.200	1.186	1.600	1.594
1.100	1.082	1.400	1.391	2.00	2.000

注：表 3-9 中 0～9 栏的数据在使用时需×10^{-3}。

表 3-10　铁谱线组及其相对强度

第一组		第二组		第三组		第四组	
λ/nm	lgI	λ/nm	lgI	λ/nm	lgI	λ/nm	lgI
316.387	0.28	295.02	1.50	315.32	1.10	324.419	1.66
316.886	0.49	287.23	1.00	315.78	1.17	323.944	1.61
316.501	0.62	286.93	2.13	315.70	1.30	322.579	2.00
[illegible]	0.83	284.04	1.08	316.06	1.36	322.207	1.90
316.644	1.00	283.81	2.30	320.53	1.60	321.738	1.34
317.545	1.30	282.88	0.76	320.04	1.68	321.594	1.48
318.023	1.56	280.45	2.59	322.20	2.05	320.540	1.44
319.693	1.80			322.57	2.16	320.047	1.51
						317.801	1.13
						317.545	1.22
						316.066	1.20
						315.789	1.01
						315.704	1.13
						315.321	0.94

表 3-11　阶梯减光板数据[29]

型号 / 透光率/% / 阶数	WSP-2 7018 (九阶梯)	WSP-2 7018 (三阶梯)	WSP-2 71 (五阶梯)	1 号 (五阶梯)	2 号 (五阶梯)
1	100	51.5	100	100	100
2	68	10.0	31.6	29.3	44.1
3	49.5	6.0	10.0	11.5	17.5
4	27.5	—	3.16	4.9	6.5
5	25	—	1.0	1.8	2.7
6	15	—	—	—	—
7	9.0	—	—	—	—
8	1.5	—	—	—	—
9	100	—	—	—	—

表 3-12　阶梯扇形板数据[29]

阶梯类型	阶　数	切割角/(°)	透光率/%	阶梯高度/mm
十阶梯扇板	1	360	100	—
	2	167.0	46.4	0.4
	3	77.7	21.5	0.4
	4	36.0	10.0	0.3
	5	16.7	4.60	0.3

续表

阶梯类型	阶　数	切割角/(°)	透光率/%	阶梯高度/mm
十阶梯扇板	6	7.8	2.15	0.3
	7	3.6	1.00	0.3
	8	1.7	0.46	0.3
	9	0.8	0.22	0.2
	10	0.4	0.10	0.2
九阶梯扇板	1	360	100	(1) 扇板半径为 30mm
	2	180	50	
	3	90	25	(2) 每阶高度 0.25mm
	4	45	12.5	
	5	22.5	6.25	
	6	11.25	3.13	
	7	5.63	1.57	
	8	2.82	0.79	
	9	1.4	0.39	
八阶梯扇板	1	360	100	0.2
	2	167	46.4	0.1
	3	78	21.5	0.1
	4	36	10.0	0.1
	5	17	4.60	0.1
	6	7.8	2.10	0.1
	7	3.6	1.00	0.1
	8	1.7	0.46	0.1
五阶梯扇板	1	360	100	0.2
	2	114	31.7	0.2
	3	36	10.0	0.2
	4	11.4	3.17	0.2
	5	3.27	1.00	0.2

第三节　发射光谱分析的主要仪器设备

一、激发光源

激发光源是光谱仪中一个极为重要的组成部分，它的作用是提供分析物蒸发、原子化和激发所需的能量，以产生特征发射光谱。

目前常用的激发光源可分为两类，一类是经典光源，包括火焰、电弧及火花光源，另一类是等离子体及辉光放电光源等。

（一）经典光源

1. 火焰光源

火焰是最早用于发射光谱分析的一种光源，按照燃烧方式可分为预混火焰和扩散火焰两种。与其他光源相比，火焰光源的优点是仪器简单，谱线少，稳定性好，其缺点是温度比较低，能有效分析的元素有限。

2. 电弧光源

发射光谱分析用的电弧光源，有直流电弧、交流电弧、多用电弧等。

(1) 直流电弧　直流电弧发生器通常包括整流线路，弧光线路和引燃线路三部分。直流电弧的主要特点是电极温度高，试样蒸发量大，检出限好，是定性、定量分析中的一种通用光源，除了一些难激发的非金属及气体元素外，周期表中大多数元素都可用直流电弧测定。

(2) 交流电弧　交流电弧是光谱分析中的一种常用光源，可分为高压交流电弧与低压交流电弧两种。交流电弧与直流电弧相比，放电温度，放电稳定性优于后者，电极温度略低于

后者，主要用于金属合金中微量易挥发元素的测定。

（3）多用电弧　多用电弧发生器是根据电弧发生器的常用线路组合起来的多性能光源。根据分析工作的需要，借助于几个转换开关，就可以选用交流电弧，交流双电弧，直流电弧点火等，并备有曝光时间控制器，是一种比较适用的光源。

3. 火花光源

火花或称电花光源，是一种电容放电，根据充电电压的高低，可分为高压火花光源、低压火花光源及控制火花光源等。

（1）高压火花光源　火花放电与电弧放电不同，它一般由放电管道及焰炬两部分组成。高压火花的放电电压直接受到分析间隙的影响，因此在实际工作中最好采用控制火花光源。

（2）控制火花光源　控制火花光源克服了高压火花光源的缺点，提高了火花放电的稳定性与再现性。控制火花光源一般分为静止间隙控制、转动间隙控制和电子线路控制火花光源三种。

（3）控波高压火花光源　控波高压火花是一种新型电子控制全波控波火花，通过供给引燃电路中闸流管栅极脉冲数来提高放电重复频率，并通过控制放电波形来提高放电精度和激发能量。这种光源由可控波形放电，放电时间可通过脉冲触发信号的宽度来控制，因而放电精度比一般的高压火花提高（2～4）倍，信噪比高，检出限低，常用于金属与合金材料中，高含量元素的测定。

（4）低压火花高速光源　这是一种每秒放电达（300～400）次的高速放电的低压火花光源。例如日本岛津公司的 SG-400 型、MPSG-300 型及国产 GS-400 型光源。此种光源由直流电源、引燃电路、主放电电压稳定电路及放电电路四部分组成。低压火花放电的主要优点是对难激发的元素具有较高的测定灵敏度。

最近，日本岛津公司在此光源基础上吸取了高能预火花光源的特点，在充放电线路上采用并联大电容或小电容及串联小电感的方法制成了 HPSG-300 型光源，使具有对电极再生及放电回路可自由变换的具有 5 种放电形式的多功能光源。5 种不同的放电形式为火花放电、高能放电、联合放电、振荡放电、反极性放电。

（5）高能预火花光源　高能预火花光源又称多级光谱激发光源，它是一种电压不高，但电流上升速度很快的电容放电光源，也是一种新型的中压火花光源，例如美国 Baird 公司的 KH-3 和 KH-5 型光源。

高能预火花光源是由计算机控制的控制电路，脉冲形成网络和引燃回路三部分组成。这种光源的主要特点是放电时放电电流及放电能量受线路中电容所控制，由于放电能量大，可对一些难激发样品进行预处理，可消除由于冶炼过程的因素造成不同结构的材料对试样分析结果的影响，有利于提高分析结果的重现性。

（二）等离子体光源

等离子体是一种电离度大于 0.1%的电离气体，由电子、离子、原子和分子等组成，其中电子数目和离子数目基本相等，整体呈现中性。在光谱分析中所谓的等离子体光源，习惯上仅指外观类似火焰的一类放电光源。目前最常用的有三类，即电感偶合等离子炬（ICP）、直流等离子体喷焰（DCP）和微波感生等离子炬（MIP）。

1. 电感偶合等离子炬（ICP）

ICP 是应用较广的一种等离子体光源。ICP 是利用电磁感应高频加热原理，在高频电场作用下，使流经石英炬管的工作气体电离而形成能自持的稳定等离子体。ICP 装置由高频发生

器、进样系统和等离子炬管三部分组成。

（1）高频发生器　高频发生器又称高频电源，分为自激式和它激式两种振荡类型。自激式振荡器由整流电源、振荡回路和电子管功率放大器组成。它激式振荡器是利用石英晶体的压电效应构成振荡器。此种振荡器性能较好，但成本较高。

（2）进样系统　ICP 的进样方式有三种，即溶液进样、氢化物进样和固体进样。

①溶液进样：在 ICP 中，用得最多的是溶液气溶胶进样系统。溶液气溶胶进样有气动雾化法和超声雾化法两种。在商品雾化器中，玻璃同轴型气动雾化器和直角型气动雾化器是最常用的两种。超声波雾化器是由超声波发生器，进样器和雾化室三部分组成，比气动雾化器复杂，但雾化效率可提高 10 倍，检出限相应地改善（3～10）倍。

②氢化物进样：生成挥发性氢化物的进样技术，在 ICP 光谱分析中的应用日益增多，并有商品仪器出售。

③固体进样：包括直接粉末引入、气化引入和悬浮物进样等方式，属于直接引入的有双

2. 格里姆辉光放电光源

格里姆辉光放电光源与空心阴极放电光源的不同之处是将表面磨平的平板状试样与阴极紧贴作为阴极的一部分，共同成为一个环形阴极，阳极部分的前端制成圆筒状，伸入环形阴极内，阳极的另一端用石英片封口。这种光源是以反常辉光放电的形式工作，其最主要优点是基体效应小，适于对试样进行表面和逐层分析，也可对高含量试样主体成分进行准确测定。

近年来，辉光放电分析技术有了较大发展，特别是射频辉光放电的出现，大大降低了分析检出限。射频辉光放电克服了原有直流辉光放电只能分析金属块状样品的缺点，它可以分析半导体、玻璃和陶瓷材料等。而且与火花光源相比，大多数元素的检出限都要低 2 个数量级，基体效应也比火花光谱分析小。

3. 激光显微光源

激光显微光源是由激光器与光学显微镜组成。通常把用激光显微光源为激发源的发射光谱仪，称为激光显微发射光谱仪，或称激光探针。激光探针与电子探针和离子探针相比，具有费用低廉，装置简单，操作维修方便等优点，主要用于微区分析。

二、光 谱 仪

光谱仪的主要作用是将从光源发射出来的具有各种波长的辐射能按波长顺序展开，以获得光谱。光谱仪的分类方法很多，根据色散元件的不同，可分为棱镜光谱仪，光栅光谱仪和干涉光谱仪三类。

（一）棱镜光谱仪

棱镜光谱仪是利用棱镜对不同波长辐射的折射率不同进行分光。根据所用棱镜材料的不同可分为玻璃棱镜光谱仪，石英棱镜光谱仪和萤石棱镜光谱仪。

（二）光栅光谱仪

光栅光谱仪是利用光的衍射现象进行分光。根据光栅光学面形状的不同，可分为平面光栅光谱仪和凹面光栅光谱仪；根据光栅的结构，可分为反射光栅和透射光栅光谱仪；按光栅刻制方式的不同，又可分为机刻光栅和全息光栅光谱仪。

1. 光栅装置

光栅装置是指将入射狭缝、准光镜、光栅、成像物镜和出射狭缝等部件装置成光谱仪的型式。光栅装置类型很多，常用的有平面光栅装置和凹面光栅装置。

（1）平面光栅装置　对平面光栅装置来说，准光镜、成像物镜是不可少的，垂直对称式平面光栅装置，又称艾伯特-法斯提（Ebert-Fastic）装置，是平面光栅光电光谱仪中常用的；还有水平对称式装置，又称切尔尼-特纳（Czermy-Turner）装置，主要用于单道扫描型平面光栅光电光谱仪。

（2）凹面光栅装置　自从罗兰提出凹面光栅有关罗兰圆成像理论之后，出现了不少凹面光栅装置，如罗兰（Rowland）装置、帕邢-龙格（Paschen-Runge）装置和瓦兹渥斯（Wadswooth）装置。在这一些装置中凹面光栅既是色散元件，又具准光及聚焦作用。这类装置结构简单，使用波长范围宽，已广泛应用于真空型多道直读光量计。

2. 光栅光谱仪的主要性能

（1）线色散率（D_L）　线色散率是指把不同波长的辐射能色散开的能力。一般用波长差为 $d\lambda$ 的两条谱线在焦面上色散开的距离 dL 来表示。

$$D_L = dL/d\lambda \ (mm \cdot nm^{-1}) \tag{3-5}$$

但在实际使用中常用线色散的倒数 $1/D_L$ 或 $d\lambda/dL$ $(nm \cdot mm^{-1})$ 来表示。

(2) 分辨率 (R) 光谱仪的分辨率是指光谱仪的光学系统能够正确分辨出紧邻两条谱线的能力。一般常用两条可以分辨开的光谱线波长的平均值 λ 与其波长差 $\Delta\lambda$ 之比来表示。

$$R = \lambda/\Delta\lambda \tag{3-6}$$

(三) 干涉光谱仪

干涉光谱仪是利用光的干涉原理设计的，这类仪器常用于高分辨光谱学研究，又称为高分辨光谱仪。发射光谱分析常用的高分辨光谱仪，有中阶梯光栅光谱仪和法布里-珀罗干涉光谱仪等。

1. 中阶梯光栅光谱仪

中阶梯光栅是介于阶梯光栅和小阶梯光栅之间的光栅制品，与普通光栅不同，它具有高精度的宽平刻槽，刻槽为直角阶梯形状，宽度比高度大几倍，且比人射波长大 (10～200) 倍，光栅刻线较少，闪耀角较大。70 年代以来，出现了多种中阶梯光栅光谱仪，以二维成像器件作为检测器的实验型中阶梯仪器也时有出现。1988 年，美国 Leeman Labs 公司首次推出了新一代 ICP/Echelle 中阶梯光栅扫描光谱仪，它采用了中阶梯光栅-弧面棱镜/透镜的设计，将色散棱镜与聚焦透镜结合在一起，一改传统的设计思路，以独特新颖的设计在众多 ICP 商品仪器中成为目前扫描速度最快、高分辨率，高检测能力的新一代光谱仪器。中阶梯光栅光谱仪由于具有体积小，线色散率和分辨率大，所有波长闪耀和全波段分析的性能，因而被认为是一种有竞争力的光谱仪器，越来越多的受到光谱分析工作者的重视。

2. 法布里-珀罗干涉光谱仪

法布里-珀罗干涉光谱仪是一种利用光的干涉原理具有高分辨率的光电光谱仪。法布里-珀罗光谱仪中，由于其光谱是干涉环，不是线形，因此光谱仪的出射光栏必须采用圆孔和环状，其出射狭缝在扫描过程中不能变动，只能改变干涉环的位置，使其顺序地通过固定的出射狭缝。常用的方法是变光学宽度法，是采用改变晶面间的气体折射率及改变标准具镜面几何厚度来进行。

此外，还有一种按照干涉调制原理制造的光谱仪，称为干涉调制光谱仪，常用的有迈克尔逊干涉调制光谱仪。

三、观 测 仪 器

光谱的观测是指用各种类型的光检测器观察测量光谱的波长及强度。常用的检测方法有看谱法、摄谱法和光电直读法。

(一) 看谱法

看谱法是以眼睛为检测器，以看谱镜或看谱计为分光系统。看谱镜只能用于定性分析，看谱计可进行半定量和定量分析。

(二) 摄谱法

摄谱法是用感光板记录光谱，用映谱仪和测微光度计进行观察和测量。

1. 映谱仪

映谱仪也称光谱投影仪，是一种放大仪器，用以观察谱片上的光谱图像。

2. 测微光度计

测微光度计又称黑度计，由显微镜和光度计组成，用于测量谱片上光谱图像的黑度。我

国常用的有德国蔡司GⅠ型、GⅡ型、MD-100型及前苏联Mф-2型，以及国产的9W型测微光度计。

（三）光电直读法

光电直读法是由光电检测器代替了眼睛和感光板，可直接得出试样中元素含量。光电直读光谱仪一般由激发光源，分光系统，接收系统等部分组成。

1. 光电光谱仪的类型

光电光谱仪可以有不同的划分方法，根据所使用波长范围的不同，可分为真空型和非真空型光电光谱仪；根据仪器结构的不同，又可分为同时型多道光电光谱仪和扫描型单道光电光谱仪。为了弥补这两类仪器的不足，目前已生产出一种新型的多道与单道扫描联合型光电光谱仪。

2. 光电光谱仪的接收系统

光电光谱仪的接收系统主要包括光电转换器件、积分器、控制系统和放大记录装置等部分。

光电转换器件是光电光谱仪接收系统的核心部分，主要是利用光电效应将不同波长的辐射能转化成光电流信号。目前应用于光电光谱仪的光电转换器件主要有光电倍增管（PMT）、光导摄像管或称视像管、析像管与光敏二极管阵列（PDA）。近年来，电荷转移器件（CTDs）作为光谱分析新一代的光电转换器件已成为原子光谱工作者研究的焦点之一[30~33]。

CTDs是一类以半导体硅片为基材的光敏元件制成的多元阵列集成电路式的焦平面检测器，它主要包括电荷偶合器件（CCD）和电荷注入器件（CID）两类。其中，CCD的应用研究显得异常活跃。

已有很多文献[34~37]描述了CTDs检测器的操作与性能，这里仅以CCD为例简述CTDs的基本工作原理。CCD运用的是经典光电效应原理，作为CCD探测器的基本元件半导体硅芯片当受到可见光照射时，由光电效应在芯片上产生电荷，在硅片表面上，施加一定的电势，使它产生贮存电荷的分立势阱，这些势阱构成探测器微元，可以收集光电效应产生的电荷，并携带电荷在芯片上移动。一个CCD芯片包含几万到几百万个微元，构成一个平面探测阵列，根据应用需要，可将位于同一行或同一列上的微元串联，同一行或同一列上收集到的电荷可一起输送到输出端，再由装在芯片角上的输出放大器将信号送往外接的微计算机处理。

CCD和CID的主要区别在于电荷读出方式的不同，CCD的读出过程是破坏性的，而CID的读出过程却具有非破坏性和随意性两大特点。

CTDs检测器是原子光谱的一个巨大飞跃，它的每一个微元都相当于一个光电倍增管，其探测阵列可将样品中所有元素的所有谱线一根不漏地记录下来，而且多条分析谱线可以同时进行定量测定。CTDs由于具有很高的光电效应和量子效率，检测速度快，线性范围可达10^{10}，具有天然的多道同时测定及二维测量的特点，因此倍受光谱学者的注意，目前已生产出配备这类器件的光电光谱仪。

3. 计算机与光电光谱仪

所谓全自动光电光谱仪，是将光谱仪及其附属设备，如切样机、磨样机、机械手、电源，空调等装置，统一安置在一个大箱子内，组成一个移动式光谱实验室，此种全自动光谱仪多放置在炼钢炉旁，工作时，工人只需将样品置于一个专用窗口的抽屉内，以后全部分析过程皆由计算机控制。由计算机指挥几个作用不同的机械手负责完成切样、磨样、送样、换样、校正仪器、试样分析以及结果发送等任务。用于全自动光谱仪的计算机不仅是光电光谱仪的计

算中心，而且还是这个移动式小型实验室的真正主宰者。

第四节 仪器的使用、维护与故障排除

一、光源的使用、维护与故障排除

1. 电弧和火花发生器的维护要求

①发生器的工作环境应通风干燥，湿度应不大于75%。

②在使用发生器之前，应检查各部件连接是否正确牢靠，尤其是地线必须连接牢固。

③定期（约工作200h）将放电盘或辅助间隙拆下，进行清理，除去氧化层，打磨光滑。保护间隙也要经常清理。安装时，间隙距离应按规定调节好。

④发生器连续工作，特别是大电流电弧工作时，应根据发生器发热情况，适当停机休息，待冷却后再用。

⑤仪器的转动部分，如马达、断续器等，应定期擦拭和加润滑油。

⑥发生器内部各部件积贮的油泥和尘土，至少每年擦拭一次。

2. 电弧发生器的一般故障排除（表3-13）

表3-13 电弧发生器的一般故障排除

故障现象	故障原因	解决办法
发生器不起弧，电源指示灯不亮，供电电源不通		应检查保险丝及电源电路
高频引燃回路不工作	断路器插销接触不良；放电间隙的距离太大或太小；电源电压过低	检查高压电路保险丝；调节放电间隙的距离；加大电源电压
接通开关后，继电器工作正常，但只有高频火花而无低频电弧电流	低压回路保险丝断开；电阻接触不好	更换保险丝
电弧电流不稳定	放电盘表面氧化；分析间隙距离太大；输出导线高频漏电；环境湿度太大；高频高压元件有电晕或击穿现象	除去放电盘表面的氧化层；调小分析间隙的距离；调整环境湿度；更换元件
继电器不工作，或工作不正常，如产生蜂鸣声，敲击声	继电器线圈接触不良；支架松动，闭合不紧密	应针对具体原因给予解决，还应检查供电情况

3. 火花发生器的一般故障排除（表3-14）

表3-14 火花发生器的一般故障排除

故障现象	故障原因	解决办法
高压电路不通；高压指示灯不亮		应先检查高压保险管和门开关工作是否正常，按钮的触头是否可靠
发生器开动后，指示灯、电压表指示正常，电流表指针偏转，但电极之间没有火花	变阻器的滑刷接触不良；变阻器的线圈断路；辅助间隙和分析间隙过大；转换开关有毛病；其他电路断路或接触不良	如果检查确定所述方面均无故障，则说明高压变压器的初级绕组可能发生故障或烧毁
发生器开动后，指示灯、电压表指示正常，电流表的指针偏转不大，电极之间没有火花	变阻器的电阻太大；电容及电感的连接处接触不良	降低变阻器的电阻；检查电容及电感的连接处，还应检查电极架的接线是否良好
发生器开动后，电流表指示电流很大，电极之间没火花		应检查高压变压器的次级绕组和电容器是否出故障

4. ICP的使用、维护与故障排除

原则上，ICP发生器调至最佳工作状态后，即能顺利点燃，稳定工作而不熄灭，但是，如果等离子炬管的进气系统的参数和状态不符合要求，也常常使等离子炬管不能点燃和工作，甚至可能将炬管烧毁。因此，在点燃等离子炬时需注意下述两点：

①燃炬时要做好充分准备，在将发生器调至最佳工作状态后，将石英炬管准确地调至感应线圈的中心，然后按预定的流速打开气源，清除系统内双原子气体（如水汽）等杂质，才

能开始点炬。

②如果发现无规则弧光放电（火焰显黄红色，并大部在管内靠近管壁处，使炬管立即烧红）时，要立即降低高压，避免炬管烧毁，针对产生无规则放电的原因，可以采取相应的措施。如冷气流量不足，可立即降低高压，开大等离子气，再点燃；如炬管位置不正确，可重新安装炬管使其位于振荡线圈的正中，再点燃；如氩气中有大量水分或系统内有冷凝水进入放电区域，可另换一瓶氩气或清除系统内水分；如出现丝状放电，可继续燃炬，直至出现炬焰为止。

表 3-15 是 ICP（PE-ICP/6500）常见故障的排除。

表 3-15 ICP（PE-ICP/6500）常见故障的排除

故障现象	故障原因	解决办法
炬管点燃，循环水指示灯时闪时断，炬管火焰突灭，不能工作	仪器自带循环水冷却系统泵压不足，磁动仪表保护开关预值过高，经常处于关闭状态，出现假保护现象	在原有循环水系统管路中串联增压泵，增加整个人水管路中的压力，除去磁动仪表开关，使水流直接进入炬管系统，保持长流水，确保炬管安全工作
反射功率超过设定值，炬管源点不着火	集成块 741 无输出正电压信号，使反射功率无法调整，控制电路失调，片子损坏	更换集成块 741
炬管电源前面板 RF-ON 失控，火点不着，ignite Switch 开关灯不亮	集成块 U_9 损坏	更换集成块 U_9
按炬管电源前面板 RF-ON 键，炬管高压偶合电容连续抖动，按 ignite 键，灯不断闪动，火点不着，电容打火放电	由于电容转动次数频繁使高压连线劳损，三分之二连线断裂，使接点连线阻值改变，当接点有高压输入时，接点不断打火发红，电容容量值改变不稳，炬管的火焰无法点燃	找一段外套屏蔽镀银线的电缆，并截取一定长度代替高压连线，用银焊焊上

二、光谱仪的维护与故障排除

1. 光谱仪的一般维护

(1) 防止积尘　室内和仪器上的积尘，要用软毛刷、皮吹风或吸尘器清除。

(2) 防止印迹　光学元件若沾上了指印或油迹，可以采用酒精、乙醚等清洗。

(3) 防止霉雾　不要用手接触光学表面，不要向仪器内部呼气，不要让油脂进入仪器内部。注意关闭谱窗，保持仪器内部和光学元件的清洁。可用硅胶吸湿，用 H50 杀霉，也可在光学表面镀憎水膜。对污染不洁和轻度霉雾的光学表面，必须用酒精、乙醚清洗干净。有不能清除的重度霉雾时，必须把光学元件重新抛光。

(4) 防止锈蚀　仪器的活动部件要定期加润滑油，防止机械磨损和生锈。仪器的外露部件要定期用汽油清洗，用适宜的防护油保护。

2. 光谱仪的一般故障排除（表 3-16）

表 3-16 光谱仪的一般故障排除

故障现象	故障原因	解决办法
谱线加宽、毛糙、断开或粘连	刀刃迟钝，毛刺以至缺口	必须重新研磨
所有谱线某处变窄或断开	狭缝被灰尘堵塞	将狭缝开大，用干净的航空汽油揩净刀面，用削成楔形的柳木小棍沿缝高方向揩净刀口
谱线呈楔形	刀刃不平行	需重新安装调整
紫外光谱减弱或消失	油脂渗入狭缝	可用航空汽油清洗干净，然后再在滑动部分加适当的润滑油
狭缝关闭失效	润滑油凝固	可用红外线烘烤
机械快门失灵	弹簧失效	应更换弹簧
电磁快门失灵	吸铁有问题	需更换吸铁或调节吸铁的活动方向
齿轮齿条空回	由消除弹簧引起	可把齿条厚度减薄，增加其弹性；把簧片重新处理或调换

续表

故障现象	故障原因	解决办法
出现谱线不规则错位	暗盒移动导轨线性不好，或局部沾有灰尘及磨损；滚动轴承与导轨接触不良	清洗和润滑暗盒移动导轨，若导轨严重磨损，必须重新装配； 可通过调节轴承的偏心轴进行补偿
谱面局部失焦	暗盒定位不正确	重新调整暗盒定位
谱面局部不清晰	特殊的（如弯曲的）定位面，在长期使用后销钉有磨损	修改定位销钉的长短，或刮去定位面部分金属
仪器漏光；谱片雾翳增加；暗盒漏光	仪器部件接缝、门盖连接处、螺钉孔、暗盒移动部分密封不当	在接缝处涂以黑色油灰，在漏光处用长丝绒密封，或加盖永久性金属防光罩； 在插板槽中垫以绒布密封

三、观测仪器的常见故障排除

1. 光谱投影仪的常见故障排除（表 3-17）

表 3-17　光谱投影仪常见故障及排除

故障现象	故障原因	解决办法
投影仪的照度下降	灯泡亮度不够	检查电源电压，或更换适宜的灯泡
光学系统透过率和反射率降低	光学元件有沾污；白色投影屏污损	可用适当方法清洗；可用航空汽油揩擦干净，损坏严重时，必须重新喷涂
像面不平	投影仪受到振动或撞击	检查置片台与导轨面是否不平，若不平，可调节滚动轴承的偏心度，使其获得校正，或校正投影物镜的光轴
置片台被卡住	置片台受到腐蚀	不要使用湿的谱片
调节绳轮失灵，绳子被拉断		更换绳子，然后校正投影物镜光轴

2. 测微光度计的常见故障排除（表 3-18）

表 3-18　测微光度计常见故障及排除

故障现象	故障原因	解决办法
灵敏度下降	光学元件积尘、生雾、发霉；减光板变质，光电池老化；检流计吊丝发硬；狭缝示值不正确	清洗光学元件表面；针对不同原因，更换减光板或光电池；更换吊丝
标尺像抖动不停	工作台振动；检流计吊丝太松；检流计断路	针对不同原因，采取不同的措施
标尺像不出现	检流计调节螺钉位置变动	需重新校正调节螺钉
标尺像静止不动	检流计短路和快门开启失灵，快门机械故障是叶片定位失效和钢丝脱落等造成	此项检查校紧，应加倍注意，针对不同原因，采取不同措施

四、光电光谱仪的维护与常见故障的排除

1. 光电光谱仪的维护

①定期清理电极架和聚光镜。

②观察银电极顶端，如有堆积物，要及时清理或重新车制。

③闸流管长期工作会逐渐老化，表现在高压变压器原边电流不稳定，注意及时更换闸流管。

④控制交流电源的接触器长期工作后，会因触点烧毁或铁芯粘连而失效，一经发现应及时更换。

⑤对真空型仪器，每半个月向真空室抽气充氩一次。

⑥定期作灯曝光试验，检查测控系统的测量精度。当多次灯曝光的 RSD>0.2%时，说明测量精度下降，需对包括光电倍增管在内的测量系统有关部位进行维修。

⑦定期作整机分析精度试验。若同一样品多次测量结果的 RSD 过高，需对仪器各有关部位进行检查，排除故障。

2. 光电光谱仪常见故障的分析与排除（表 3-19）

表 3-19 国产及自制光电光谱仪常见故障的分析与排除

故障现象	故障原因
激发光源不启动	电极架罩门没关好；光源预热时间不够；控制电路不通；接触器损坏；电源没有接通；保险熔芯断路
激发光源闸流管不工作	没插触发板；触发板损坏；自偶调压器输出电压过低；自偶调压器损坏，闸流管接触不良或已损坏；高压整流硅堆开路；拨盘开关在空挡；闸流管灯丝变压器损坏
电极架分析间隙无火花放电	对电极与样品短路；电极架击穿短路；光源输出高压电缆与机箱短路；高压二极管串击穿短路
表头 V2 满刻度偏转	高压变压器损坏；高压整流硅堆损坏；高压电容器漏电；两个高压二极管串都击穿
表头 V2 指示摆动过大	闸流管失效；闸流管氢发生器限流电阻阻值不合适；触发板波形失常
所有通道灯曝光超差	负高压电源输出不稳定；试验灯接触不良；高压插头座没插好；接口箱 101 板坏；积分箱输出/控制板坏
个别通道灯曝光超差	光电倍增管失效；光电倍增管管座损坏；衰减器拨盘开关损坏；积分箱积分板坏
所有元素分析超差	激发光源有故障；聚光镜污染严重；入射狭缝没对准；测量系统有故障
个别元素分析误差	出射狭缝没对准；氩气管道污染严重

参 考 文 献

1 《光电光谱分析》之 4. 光谱实验室，1993；10（增刊）：4～100
2 Dahlguist R L. ICP Inf Newslett，1975；1：148
3 Long S E，Snook R D，Browner R F. Spectrochim Acta，1985；40B：553
4 Dean J R，Snook R D，J Anal At Spectrom，1986；1：461
5 Blakemore W M，Casey P H，Collie W R. Anal Chem，1984；56：1378
6 Dean J R，Zhang L，Snook R D. Analyst，1985；110：1395
7 Hull D R，Horlick G. Spectrochim Acta，1984；39B：843
8 Alvarado J，Cavalli P，Omenetto N et al. J Anal At Spectrom，1987；2：357
9 Matusiewicz H，barnes R M. Spectrochim Acta，1984；39B：891
10 Mahanti H S，Barnes R M. Anal Chem，1983；55：408
11 Mahanti H S，Barnes R M. Anal Chim Acta，1983；151：409
12 Ng K C，Caruso J A. Anal Chim，1983；54：1513
13 Abdullak M，Fuwa K，Haraguchi H. Spectrochim Acta，1984；39B：1129
14 Matusiewicz H，Fricke F L，Barnes R M. J Anal At Spectrom，1986；1：203
15 王小茹，Barnes R M. 痕量分析，1989；5（3）：11
16 黄敏，江祖成，曾云鹗. 分析试验室，1991；10（3）
17 黄敏，江祖成，曾云鹗. 分析化学，1991；19（10）：1192
18 Hall G E M，Jean-Claude P，boomer D W et al. J Anal. At Spectrom，1988；3：791
19 Matousek J P，Satumba R T，Bootes R A. Spectrochim Acta，1989；44B：1009
20 Golloch A，Haveresch-kock M. J Anal Appl Pyrolysis，1993；25
21 Huang M，Jiang Z C，Zeng Y. J Anal At Spectrom，1991；6：221
22 Memon M A，Wang X R，Huang B L. 5th Beijing Conf and Exhib. on Instrum. Analysis，1993；C9
23 Huang B L et al. 5th Beijing Conf and Exhib. on Instrum，1993；C1
24 Lin S L，Pang C F. J Anal At Spectrom，1991；5：509
25 Wiedrin D R. Houk R S. Appl Spectrosc，1991；45B：1408
26 Browiner R F. 1992 Winter coference on plasma Spectrochemistry，1992；M12
27 福建省地质中心实验室编. 光谱分析仪器与常用技术资料（内部资料），1977
28 《发射光谱分析》编写组. 发射光谱分析. 北京：冶金工业出版社，1979；367
29 杭州大学化学系分析化学教研室编. 分析化学手册，第三分册. 北京：化学工业出版社，1983；844
30 Lepla K C，Horlick G. Appl Spectrosc，1989；43：1187
31 Brushwyler K R，Furuta N. Hieftje G M. Spectrochim Acta，1991；468B：85
32 Pomeroy R S，Jalkian R D，Denton M B. Appl Spectrosc，1991；45（7）：1120
33 Bilhon R B，Denton M B. Appl Spectrosc，1989；43（1）：1
34 Sims G R，Denton M B. In Multichannel Image Detectors，ed Y Talmi，ACS Symposium Series，No236，1983，Vol 2，Chap 5
35 Denton M B et al. In Multichannel Image Detectors，ed Y Talmi，ACS Symposium Series，No236，1983，Vol 2，Chap 6
36 Bilhorn R B，Denton M B. Appl Spectrosc，1987；41（7）：1114
37 Sweedler J V，Denton M B. Anal Chem，1988；60（4）：282A

第四章　发射光谱分析法的应用及进展

第一节　分离富集技术在现代发射光谱分析中的应用与进展

近年来，在运用原子发射光谱法（AES）进行地质、生物、环保、农业和工业等样品的分析时，经常要求测定含量为10^{-6}，10^{-9}甚至10^{-12}的痕量元素。虽然常用的ICP-AES有很高的灵敏度，但要直接测量痕量元素，也是很困难的，因此必须采用分离富集技术与之相配合。发射光谱分析中，分离富集技术的采用，可使分析检出限、精密度和准确度获得巨大改善，并使方法的应用范围得到扩大。

一、分离富集-AES分析技术的分类

根据分离富集的不同途径，可将分离富集-AES分析技术分为以下四类。

1. 化学光谱法

化学光谱法是一种化学预分离富集与AES相结合的方法，是采用化学方法把待测杂质元素转变为所需的化合物形式，选择相应的方法进行预富集，然后对杂质浓缩物进行AES测定。常用的方法有挥发法、萃取法、离子交换法和沉淀法等。化学光谱法适用于广泛领域的多种样品分析。

2. 物理预分离富集光谱法

物理预分离富集光谱法是一种将物理预分离富集与AES相结合的方法，是利用待测杂质与基体分馏特性的差异，将其分离富集，然后进行AES测定。常用的方法有蒸发法、真空蒸馏法等。蒸发法主要用于难熔物质中易挥发和中等挥发杂质元素的测定；真空蒸馏法主要用于易挥发物质中难挥发杂质的测定。

3. 直接光谱分析法

直接光谱分析法的特点是分离富集与光谱测定几乎是同时进行，主要有载体蒸馏法和电弧浓缩法。载体蒸馏法主要用于难熔物质中易挥发和中等挥发杂质的测定，电弧浓缩法主要用于矿物岩石中难挥发杂质的测定。

4. 色谱-等离子体-AES联用技术

根据气态或液态样品中杂质元素与主体成分的不同化学状态和色谱行为，采用气相色谱(GC)和液相色谱(LC，包括HPLC和TLC)进行预分离，然后对色谱馏出物进行AES检测。这类方法主要有GC-等离子体光谱(PAES)联用技术及LC(或HPLC，TLC)-PAES联用技术。前者主要用于气态或易气化物质的分析，后者则是溶液中各元素存在状态分析的有效手段。

二、分离富集-AES法简介

（一）化学光谱法

1. 挥发法

挥发法主要是利用基体物质本身的易挥发性，或经过一定化学反应，使基体元素生成沸点较低的易挥发化合物，由蒸发除去，残留物用于AES测定。表4-1列出了一些基体转化为易挥发化合物分离的情况。

表 4-1 基体转化为挥发形式化合物分离[1]

基体元素或化合物	蒸馏化合物形式	富集杂质	反应气体或试剂
As	$AsCl_3$ $AsBr_3$	Al，Fe，Ca，Mg，Mn，Cu，Ni，Pb，Sb，Cr，Bi，Si，P	HCl↑，Br_2
GaAs	$AsCl_3$ $GaCl_3$ $AsBr_3$	Al，Bi，Mg，Mn，Cu，Ni，Pb，Ag，Cr	HCl↑，Br_2
InAs	$AsBr_3$	Al，Bi，Be，Cd，Ca，Co，Cu，Mn，Mg，Ni，Pb，Ag，Cr，Zn	HBr，Br_2
Ge	$GeCl_4$	Ag，Au，Al，Ba，Bi，Ca，Co，Cr，Cu，Cd，Mg，Mn，Mo，In，Fe，Tl，Ti，Sn，Sb，Pb，V	HNO_3，HCl
Se	$SeBr_4$	Cu，Cd，Tl，Pb，Te，Fe	HBr
Si	SiF_4	Ca，Mg，Al，Ti，V，Cr，Mn，Fe，Co，Ni，Cu，Ag，Cd，Sn，Pb，Bi	
B	BF_3	Mn，Mo，W，Ta	HF
B	B $(OC_2H_5)_3$	Mn，Fe，Al，Ca，Pb，Cr，Ni，Ga，Bi，Ag，Co，Mg，Cu，Mo，Sn	HCl C_2H_5OH
Sb	$SbCl_3$	Cd，Mn，Fe，Au，Mg，Pb，Cr，Al，Ti，Ca，In，Cu，Ag，Zn，Co，Ni	HCl↑ Cl_2↑
Sn	$SnBr_2$ $SnCl_2$	Al，Bi，Mg，Mn，Cu，Co，Ni，Ag，Pb，In，Mo，Ca，Cd 等	Cl_2 或 Br_2

2. 萃取法

溶剂萃取法是以分配定律为依据，利用与水不相溶的有机试剂同试液一起振荡，使一些组分进入有机相，另一些组分仍留在水相，从而达到分离目的。萃取有两种方式可供选择，一种是萃取基体，使基体与大多数杂质分离，另一种是用有机络合剂萃取痕量杂质而与大量基体分离。萃取分离后，将有机溶剂蒸发，用溶液干渣法进行 AES 测定。表 4-2 列出了一些常见元素的萃取法。

表 4-2 常见元素的萃取法[2]

基体物质	待测定元素	萃取系统及条件	检出限 $c/(\mu g \cdot ml^{-1})$
Cd	Tl	$8mol \cdot L^{-1}HCl$，乙醚	<1
In	Tl、Fe、Ga	$6mol \cdot L^{-1}HCl$，乙醚或异丙醚	>0.01
Al	Fe、Ga	HCl，甲基异丁基甲酮或乙醚	<1
Cu	Au	$HCl+HNO_3$，醋酸乙酯	<1
Ni	Fe、Co	HSCN，磷酸三丁酯	>0.1
Bi	Zn	HSCN，乙醚	>0.5
U	B	四苯基氯化钾，三氯甲烷	>0.005
Zn	Cd	$0.1mol \cdot L^{-1}KI(pH=3)$，液态阴离子交换树脂二甲苯溶液	>0.5
Be	Li	$1mol \cdot L^{-1}KOH$，$0.1mol \cdot L^{-1}$2-三甲基乙酰甲烷乙醚溶液	>3
Ge	As、Bi	$2mol \cdot L^{-1}HCl$，二乙胺基硫代甲酸二乙胺，三氯甲烷	>0.005
Al、Ti、Zr	V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Mo、Pd、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Te、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、U	pH=3、5、7、9，吡咯烷酮二硫代氨基甲酸铵，三氯甲烷，双硫腙	>0.1
Se	Al、Sc、Ti、V、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Y、Zr、Mo、Pd、Ag、Cd、In、Sn、Sb、La、Hf、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Th、U	8-羟基喹啉，双硫腙，三氯甲烷	>0.1
W	Cu、Ni、Pb、Zn、Co	双硫腙、三氯甲烷	0.5
W	Ni	丁二酮肟	>0.5
Fe	Mn、Cu、Ni、Cr、V、Co、Al、Pb、、Ti、Zr、Ag、As、Bi	HCl 乙醚或甲基异丁基甲酮或异丁基醋酸	0.05～1
K	Mn、Cr、Bi、Ni、Mo、Be、Ti、Zr、Cd、V、Zn、Co、Mg、Ca、Cu、Pb、Al	$(6\sim8)\ mol \cdot L^{-1}HCl$，二异丙醚或乙醚	>0.005
As	Si、Mg、Mn、Cr、Ni、Bi、Al、V、Zr、Co、Cd、Be	$8mol \cdot L^{-1}HCl$，二异丙醚	>0.01
U	Mn	HCl，磷酸三丁酯、三氯甲烷	<1
Te	Cu、Pb	$HCl+NHO_3$，甲基异丁基甲酮	>0.1

续表

基体物质	待测定元素	萃取系统及条件	检出限 $c/(\mu g \cdot ml^{-1})$
Au	Bi、Cu、Pb、Fe、Ag、Mg	HCl，乙醚或醋酸乙酯	<1
Au	Bi、Cd、Cu、Fe、Ni、Pb、Zn、Pt、Pd	$3mol \cdot L^{-1}HBr$，二异丙醚	>0.1
Hg	Fe、Cu、Ni、Mn、Pb、Cd、Zn、Bi	碘化物或碘化物+溴化物溶液，环已酮	$ng \cdot ml^{-1}$级
In	Cu、Cd、Pb、Bi、Zn、Li、Na、K、Rb、Cs、Be、Mg、Ca、Sr、Ba、Al、Sc、Y、Eu、Yb、Ti、Zr、V、Cr、Mn、Co、Ni、Rh、Pd、Pt	$5mol \cdot L^{-1}HBr$，二异丙醚	>0.01
Bi	Fe、Cu、Pb、Ni、Zn、As	碘化物，环已酮	<1
Fe	Al、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Ti、V、W、Zr及分散元素	HCl，二乙醚	
Fe	Co、Cr、Mn、Ni	HCl，乙醚	
Fe	稀有元素	HNO_3，二乙醚	
Ga	Al、Ca、Cr等多种元素	(6~7) $mol \cdot L^{-1}HCl$，二异丙醚	
Nb	多种元素	H_2SO_4，二乙醚+3-丁烷基磷酸盐	
Th	Eu、Gd、Sm	HNO_3，二乙醚	
U	Eu、Gd、Sm、Cd、Co、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn、K、Li、Mg、Na	HNO_3,二乙醚或CCl_4+3-丁烷基磷酸盐	
Be	24个元素	$4mol \cdot L^{-1}HCl$,$CHCl_3$+乙酸盐、萃取醋酸铵	
Zr	Al、Be、Mg、U、Zn、Sc	(1~2) $mol \cdot L^{-1}HCl$，$CHCl_3$或$1mol \cdot L^{-1}H_2SO_4$，$CHCl_3$+铜铁灵	
Ti	Al、Cr、Mg、P	$CHCl_3$+乙醚+铜铁灵	
Pu	多种元素	HNO_3+HCl，$CHCl_3$+铜铁灵或甲基异丁酮	
Li LiOH Li_2CO_3	多种元素	用氯仿以双硫腙、二乙氨基二硫代甲酸盐、8-羟基喹啉形式，萃取杂质元素	
Sr	多种元素	用氯仿萃取二乙氨基二硫代甲酸盐，分离杂质	
Ba	多种元素	用氯仿萃取二乙氨基二硫代甲酸盐，分离杂质	
Tl	多种元素	$6mol \cdot L^{-1}HCl$，乙醚	
硅酸盐矿物	Ag、Bi、Cd、Co、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn	pH=9，$CHCl_3$、二苯硫代偕肼腙	
矿物水	多种元素	pH=3~9，$CHCl_3$，二苯硫代偕肼腙，二乙基二硫化氨基甲酸钠	
Ti及其化合物	26种元素	pH=3~9，$CHCl_3$二苯硫代偕肼腙(双硫腙)，吡咯烷酮二硫代氨基甲酸铵	
Zr及其化合物	26种元素	pH=3~9，$CHCl_3$，双硫腙，吡咯烷酮二硫代氨基甲酸铵	
高纯Se	30种元素	pH=3~9，$CHCl_3$，双硫腙、8-羟基喹啉	
合成纤维灰	多种元素	pH=3~9，$CHCl_3$，双硫腙、吡咯烷酮二硫代氨基甲酸铵	
酸	Cd等	氨水介质、$CHCl_3$、双硫腙	
FeS_2矿	Hg等	中性介质、$CHCl_3$、双硫腙	
生物	Cd	$1.25mol \cdot L^{-1}NaOH$，$CHCl_3$、双硫腙	
植物、土壤	Co、Cu、Zn	pH=8~9，$CHCl_3$，双硫腙	
矿源水	Sn	pH=5~6，CCl_4，双硫腙	
水	32种元素	pH=3~9，$CHCl_3$，双硫腙，8-羟基喹啉	
植物灰	约20种元素	pH=3~9，$CHCl_3$，双硫腙，8-羟基喹啉和二乙基二硫代氨基甲酸钠	
土壤和岩石	Cr、Mo、Sn、V和其他的共计约20种元素	pH=8~9，3.5~4，$CHCl_3$，双硫腙和吡咯烷酮二硫代氨基甲酸铵	
天然水	Ag、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Mo、Ni、Pb、Sn、V	双硫腙，CCl_4	
铁矿石	Ag、Bi、Co、Cu、Hg、Pb、Zn	CCl_4或$CHCl_3$，双硫腙	
天然水	Ag、Co、Cu、Ni、Pb	pH=9，CCl_4，双硫腙	
水	25种元素	pH=3~5，$CHCl_3$，双硫腙，8-羟基喹啉，二乙基二硫代氨基甲酸钠	
高纯Al	18个元素	pH=3~9，$CHCl_3$，双硫腙、二乙基二硫代氨基甲酸钠	

续表

基体物质	待测定元素	萃取系统及条件	检出限 $c/(\mu g \cdot ml^{-1})$
天然水	Ag、Co、Cu、Ni、Pb、Zn	pH=3～9，CCl_4，二乙基二硫代氨基甲酸钠	
天然水	Ag、Bi、Co、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sn、V	pH=4.7～4.9，$CHCl_3$，二乙基二硫代氨基甲酸钠	0.0001
电解 Zn	Co、Ni	pH=4.7～4.9，$CHCl_3$，二乙基二硫代氨基甲酸钠	
硅酸盐矿物	Ag、Bi、Cd、Co、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn、Fe	pH=8～9，CCl_4，二乙基二硫代氨基甲酸钠，或 pH=6，$CHCl_3$，二乙基二硫代氨基甲酸钠	
海底沉积物	Ag、Bi、Co、Cu、Mn、Mo、Ni、Pb、Sr、V	pH=4.8，$CHCl_3$，吡咯烷酮二硫代氨基甲酸铵	
土壤	16 个元素	pH=4.8，$CHCl_3$，吡咯烷酮二硫代氨基甲酸铵	
天然水	Al、Co、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、V、Sn、Ti、Zr	pH=3.5～9，$CHCl_3$，8-羟基喹啉或 pH=2，$CHCl_3$，亚硝基代苯胺	
矿石、矿物	In、Ga	pH=3.2，$CHCl_3$，8-羟基喹啉	
碱金属	Fe、Mn、Mo、Nb、Ni、Ta、Ti、Sn、W、Zr	pH=6～7、4～5、2～3，20%HCl，丁烷与 $CHCl_3$ 混合液，8-羟基喹啉	
生物灰	Co、Cu、Fe、Mo、Mn、Pb、Zn	$3mol \cdot L^{-1}H_2SO_4$，或 pH=2～6，$CHCl_3$，乙酰丙酮，二乙基二硫代氨基甲酸钠	
工业废物	Ga	HCl，乙醚	
Zr	Ta	$2mol \cdot L^{-1}H_2SO_4$，环己烷，氟化物	

3. 离子交换法

离子交换法是利用离子交换剂与溶液中离子间所发生的交换反应来进行分离的方法。

离子交换法可分为分批法（静态）和柱上法（动态）两种基本类型。分批法是将欲处理的试液与一定量的树脂相接触，在离子交换反应达平衡后，用过滤、倾泻或离心沉降等方法将两相分开；这种方法操作简单，但效率较低。柱上法是将欲处理试液通过装有树脂的交换柱，经交换、淋洗、洗脱等步骤，达到分离目的；这种方法的交换效率高，因此比较常用。

离子交换剂的种类很多，主要分为无机和有机离子交换剂两大类。目前在分析化学中应用较多的是有机离子交换剂，又称离子交换树脂。根据树脂中存在的可交换活性基团的不同，离子交换树脂可分为阳离子交换树脂和阴离子交换树脂。此外，在痕量分析中，还有螯合型树脂等。

4. 沉淀法

沉淀法是利用沉淀反应进行分离的方法。在样品溶液中加入适当的沉淀剂，使被测组分沉淀出来或将干扰组分沉淀出去，从而达到分离目的。在超纯分析中，用简单的沉淀法常不能达到目的，此时需加入收集剂共沉淀分离。常用的收集剂有无机和有机收集剂两类，无机收集剂多为利用表面吸附进行共沉淀，表 4-3 为共沉淀法一览表，表 4-4 为常用的沉淀法一览表。

表 4-3 共沉淀法一览表[2]

收集剂	共沉淀的主要元素
CuS	Zn、Ga、Mo、Te、Rh、Pd、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi
HgS	Zn、Ga、Ge、Ag、Cd、In、Tl、Pb、Bi
PbS	Cu、Pd、Au、Tl
CdS	Fe、Cu、Hg
$Al(OH)_3$	Be、P、Ti、V、Cr、Fe、Co、Ni、Zn、Ga、Zr、Nb、Mo、Ru、Rh、Sn、La、Eu、Hf、W、Ir、Pt、Bi、U
$Fe(OH)_3$	Mg、Al、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Zn、Ge、As、Se、Zr、Mo、Ru、Rh、Cd、Sn、Te、W、Ir、Pt、Tl、Bi、Th、U、Pb
$Mn(OH)_4$	Al、Cr、Fe、Mo、In、Sn、Sb、Au、Tl、Bi、Th、Pa

续表

收集剂	共沉淀的主要元素
ZnO	Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Cu、Zr、Nb、Mo、In、Hf、Ta、W
HgCl	As、Se、Pd、Te、Pt、Au
Te	Pd、Ag、Pt、Au、Hg、Se
8-羟基喹啉铜盐	Mg、Al、Ca、Mn、Fe、Zn、Cd、Hg
亚硝基苯胲铜铵	Ti、V、Fe、Zr、Nb、Mo、Sn、Hf、Ta、W、Bi
p-二甲氨基亚苄基绕丹宁	Pd、Ag、Au、Hg
双硫腙	Co、Cu、Zn、Pd、Ag、Au、Hg
NH_4OH+NH_4Cl	Cu、Zn、Cd、Ni
吡啶+氯化吡啶	Cu、Co、Ni
$MnO_2 \cdot nH_2O$	Bi、In、Fe
Hg	Ag、Au
铜铁试剂	Zr、V、Ti
As	Se、Te
K_2MnO_4	Re（用氯化四苯砷沉淀）
甲基紫+丹宁	W
二甲氨基偶氮苯+甲基橙	Tl

表 4-4 常用沉淀法一览表[2]

基体物质	待测定元素	沉淀物形式	检出限 $c/(\mu g \cdot ml^{-1})$
Ag	Cu、Zn、Cd、Ni、Co、	AgCl	
Pb	Bi	$PbCl_2$	>0.5
Pb	24个元素	$PbSO_4$	
Pb	Zn	PbS_2O_3	>0.2
Ni	Co	过氯酸镍六氨络合物	<1
Te	Cu、Pb	TeO_2	>0.1
Si	B	Na_2SiO_3	>0.1
Ge	B	Na_2GeO_3	>0.1
Cu	Fe、Pb	$Cu(SCN)_2$	
U	Ag	与碘化铊聚集沉淀	>0.4
Be、U、Zr、Ti	稀土元素	与氟化钇聚集沉淀	>0.1
In	Mo、Pd、Sb、Bi、Au、Hg、Cd	与硫化铜聚集沉淀	<1
Cr	P	与 $Al(OH)_3$ 聚集沉淀	<1
Ag	Bi	与 $Al(OH)_3$ 聚集沉淀	>0.5
Ag	Bi、Pb、Te	与 $Fe(OH)_3$ 聚集沉淀	<1
Cu	As	与 $Fe(OH)_3$ 聚集沉淀	<1
Cu	Sn	与 $Mn(OH)_4$ 聚集沉淀	>0.1
Pb	Sb、Te	与 $Mn(OH)_3$ 聚集沉淀	<1
Cr、Ni、Mg、Cu、Zn、Ag	Pb	与铬酸钡聚集沉淀	<1
Cu	Au	与 Te 聚集沉淀	<1
Cu、Pb	Se、Te	与 As 聚集沉淀	>0.2
In	Sn、Ti、Zr、Hf、V、Nb、Ta、Mo、W、Fe、Bi	与亚硝基苯胲铜铵聚集沉淀	<1
Cu	Ag	与 *p*-二甲氨基亚苄基绕丹宁聚集沉淀	<1
Bi	Ag	与 *p*-二甲氨基亚苄基绕丹宁聚集沉淀	<1
As	杂质	用 $Bi(OH)_3$ 共沉淀杂质	
Bi	杂质	用 BiI_3 沉淀分离 Bi	
Bi	杂质	用 $Bi(NO_3)_3$ 沉淀分离 Bi	
As	杂质	用 $Bi(OH)_3$ 共沉淀 As	
Ga	杂质	用 $Bi(OH)_3$ 共沉淀杂质	

（二）物理预分离富集光谱法

1. 蒸发法

蒸发法是以待测杂质元素与基体成分的分馏效应为立足点，用物理方法控制样品的蒸发温度，进行杂质与基体的分步蒸馏，从而达到分离目的。

2. 真空蒸馏法

采用真空蒸馏技术，可将易挥发基体成分除去，使难挥发的杂质留下并被浓缩，然后移至碳电极小孔中进行光谱测定。这种方法的精密度较差。

表 4-5 为元素从碳电极孔穴蒸发顺序，表 4-6 是常见元素蒸发法。

表 4-5 元素从碳电极孔穴中蒸发的顺序[1]

金属合金	Hg、As、Cd、Zn、Te、Sb、Bi、Pb、Tl、Mn、Ag、Cu、Sn、Au、In、Ga、Ge、Fe、Ni、Co、V、Cr、Ti、Pt、U、Zr、Hf、Nb、Th、Mo、Re、Ta、W、B
贵金属合金	Ag、Au、Pd、Rh、Pt、Ru、Ir、Os；铂族金属位于金属合金顺序中 Co 与 Mo 之间
氧化物	Hg、As、Cd、Zn、Bi、Sb、B、Pb、Tl、Mo、Sn、W、Mn、Mg、Cu、Ge、In、Ga、Fe、Co、Ni、Ba、Sr、Ca、Si、Be、Al、V、Cr、Ti、U、So、Mo[2]、Re[2]、Zr、Hf、Th、Nb、Ta、W[2]、B[2][3]；碱金属（Li、Na、K、Rb、Cs）位于 Zn、Mn 之间，稀土（Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu）位于 Cr、Th 之间 这个顺序的前部是挥发性相当大的氧化物，末尾是难挥发和还原很慢的氧化物以及在蒸发过程中生成难挥发的金属或碳化物的氧化物 （Hg、As、Cd、Zn、Bi、Sb、B[4]、Pb、Tl、Mo[4]、Sn、W[4]、Cs、Rb、K、In、Na、Ga、Li、Ge、Cu）、（Mn、Sr、Mg、Al、Si、Fe、Co、Ni、Ba、Ca、Cr、V）、（Be、Ti、稀土元素、Sc）、（U、Mo[4]、Th、Zr、Hf、Nb、Ta、W[4]、B[4]） 稀土元素中的 Yb、Eu、Sm 位于顺序的中间，Yb、Eu 与 Al、Si 相近，Sm 与 Cr、V 相近
碳酸盐	Cd、Zn、（K、Na、Li）、Pb、Tl、Mn、Mg、Cu、Fe、Co、Ni、Ba、Sr、Ca[3]；圆括弧内的元素同时进入弧焰 [Cd、Zn（K、Na、Li）、Pb、Tl]、[Mn、Mg、Cu]、[Fe、Co、Ni]、[Ba、Sr、Ca[3]]；圆括弧内的元素同时进入弧焰，方括弧是进入弧焰条件近似的元素
磷酸盐	(Cd、Zn、Bi、Sn、Pb、Na)、(Mn、Mg、Cu)、(Fe、Co、Ni)、Ca、Al、Cr、(La、Y、Th、Zr) 磷酸盐蒸发时，磷线总是在燃弧后的最初阶段出现 位于后边的几个元素，与 P 出现的顺序有明显差异，位于中部的元素与 P 出现的顺序差异不明显，而位于开头的几个元素与 P 同时出现[5] 当蒸发磷酸盐时，磷线常常在燃弧初期出现，但其持续时间与磷酸根所结合的元素的沸点有关[5]
硫化物	Hg、As、Ge、Cd、Pb、Sb、Bi、Zn、Ti、Mo、Re、In、Ag、Cu、Ni、Co、Mn、Fe、Mo[4]、Re[4]
氯化物	（Li、Na、K、Rb、Cs）、Mg、（Ca、Sr、Ba）；圆括号内元素同时进入弧焰
硫酸盐	K、Na、Mg、Li、Ca、Ba；在弧焰中直接引入样品的蒸发
氧化物	[As、Re、Hg、Tl、Sb、Mo、Pb、Cd、Bi、W、Zn、（K、Na、Li）、B]、[Ge、Ga、In、Cu、Fe、Co、Ni、Si]、[Ba、Sr、Ca、Mg、Al、Be、Sc、稀土元素、Hf、Zr、Th]；此顺序和硫化物顺序中的方括号中元素光谱，在弧焰中出现的时间有明显的区别
硫化物	[As、Hg、Sb、Sn、Ge、Pb、Cd、Zn、Mo、Ag、Tl、In]、[Cu、Fe、Co、Ni、Mn]

① 样品从阴极电极孔穴中蒸发。

② W、Mo、Re 都位于顺序的末尾，这是因为它们很快生成极难挥发的金属及碳化物的缘故，而氧化硼则在蒸发过程中生成难挥发的碳化物。

③ 冶金工业部科技情报产品标准研究所编译．光谱线波长表，1971：809。

④ 为还原成金属或碳化物的情况。

⑤ 岩石矿物分析编写小组．岩石矿物光谱分析，1974：75。

表 4-6 常见元素蒸发法

基体物质	状态	待测定元素	状态	蒸发方法	检出限/$\mu g \cdot ml^{-1}$
Na	固态	C（>1$\mu g \cdot ml^{-1}$）	气态	真空蒸馏、分离待测定元素	1
Al	固态	Fe、Cu、Cr、Ag、Pb、Mn、Co、Ni（>0.02$\mu g \cdot ml^{-1}$）	气态	与溴乙醚反应后、真空蒸馏	0.02
石墨	固态	B（>0.1$\mu g \cdot ml^{-1}$）	气态	加 KOH、700℃灰化	0.1
P、As、Sb	固态	Li、Na、K、Cd（>0.1$\mu g \cdot ml^{-1}$）	气态	高温氯气处理后、真空蒸馏	0.1
Zr	固态	Cd（>0.1$\mu g \cdot ml^{-1}$）	气态	高温氯气处理后，真空蒸馏	0.1
U_3O_8	固态	B、Cd、In、Ge、Ga、Au、Cu、Fe、Ni、V、Sb、Pb	气态	U_3O_8 中加入载体、在空气中用特制的蒸发器蒸发，温度为 2000℃	0.01～100
Al_2O_3	固态	Cd、Sb、Bi、Pb、Sn、Cu	气态	1200～1600℃（Cu 为 1400～1600℃）真空蒸发分离待测定元素	0.01～1
ThO_2	固态	Li、Be、B、Na、K、Mn、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ti	气态	1900℃，（Be、Ti2000～2100℃）真空蒸发、分离待测定元素	0.1～10
BeO	固态	B、Li、Na、Ca、Mn	气态	1750～1800℃、真空蒸发、分离待测定元素	0.1
PuO_2	固态	Be、Ni、Ti、Ba、Na、K、Li、Mn、Si、B、Co、Cd、Ag	气态	1800℃真空蒸发、分离待测定元素	1～10
Cu	固态	Mn、Bi、Zn、Fe、Si、Mg、Pb、Ag、Ni、Sb、As、Sn、Cd	气态	1300℃空气中蒸发、分离待测定元素	0.01～1

续表

基体物质	状态	待测定元素	状态	蒸发方法	检出限/ $\mu g \cdot ml^{-1}$
Ni	固态	Mn、Bi、Zn、Fe、Si、Mg、Pb、Sn、Cd、Cu	气态	1350℃空气中蒸发、分离待测定元素	1～10
Zn	固态	Cu、Bi、Sn、Ni、Pb、Fe、Al、Sb	固态	500℃真空中蒸发、Zn转化为气态分离基体Zn	0.01～10
ZrO_2	固态	B、Bi、Cd、Cr、Fe、K、Na、Li、Ni、Mn、Pb、Sb、Sn、Si、Al、Mg	气态	2000～2100℃空气中蒸发分离待测定元素	0.1～1000
Ta_2O_5	固态	Bi、Cd、Sn、Pb、Sb	气态	1400℃空气中蒸发、分离待测定元素	0.1～10
GaAs	固态	多种元素	气态	与氯气反应、转化为Ga、As氯化物挥发、分离基体	
Ti TiO_2	固态	多种元素	气态	用HF蒸发处理、挥发TiF_4分离基体	
Be、Zr、Th、U、Ni	液态	B	气态	在CH_3OH中蒸馏、分离B	>0.1
U、Pu	液态	Si	气态	在$HClO_4+HF+HNO_3$中蒸馏、分离Si	<1
Ni	液态	S	气态	在HCl或$HCl+HI+H_3PO_4$中蒸馏分离S	<1
Te	液态	As、Sn	气态	在$HClO_4+HBr+HCl$中蒸馏分离As、Sn	>0.5
Te	液态	Sb	气态	在$H_2SO_4+HBr+HCl$中蒸馏、分离Sb	>0.5
金属	液态	N	气态	在碱溶液中蒸馏、分离N	>1
Si	液态	Pb、Cd、Fe、In、Cu、Ni、Tl、Bi、Zn、P、Al	液态	在$HF+HNO_3+HClO_4$或$HF+H_2SO_4$中蒸馏、分离Si	>0.01
Cr	液态	Fe、Ni、Al、Mn、Ti、V、Mg、Cu	液态	在$HCl+HClO_4$中蒸馏、分离Cr	0.1～30
Ge	液态	Ga、In、P、Sb、Cu、Ag、Be、Fe、Mg、Mn、Al、Bi、Cd、Ni、Pb	液态	在$HCl-HNO_3+HClO_4$中蒸馏、分离Ge	>0.01
As、KAs	液态	Si、Mg、Mn、Cr、Ni、Bi、Al、V、Zr、Co、Cd、Be	液态	在$HCl+CCl_4+Br_2$中蒸馏、分离As	>0.01
Se	液态	Cu、Pb、Ni、Co、Tl、Al、Tl	液态	在$HNO_3+H_2SO_4$或HNO_3或H_2SO_4中蒸馏、分离Se	>0.1
Se	液态	Cu、Cd、Tl、Pb、Te、Fe、S、Ga碱金属、碱土金属	液态	在HBr中蒸馏、分离Se	>0.001
Sn	液态	Fe、Cu、Pb	液态	在$HCl+HBr+Br_2$或$HBr+Br_2$中蒸馏、分离Sn	
Bi	液态	Pb	液态	在HBr中蒸馏、分离Bi	>1
Ge	液态	Mg、Ca、Ba、Al、Ti、V、Cr、Mo、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ag、Au、Zn、Cd、In、Tl、Sn、Pb、Sb、Bi	液态	在HCl中蒸馏、富集系数可达50～100、分离Ge	0.1～0.01
Sn	液态	Mg、Ca、Ba、Al、Ti、V、Cr、Mo、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ag、Zn、Cd、In、Pb、Bi	液态	在$HCl+H_2O_2$中蒸馏，富集系数可达15～20、分离Sn	0.1～10
Sn	液态	Mg、Ca、Ba、Al、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ag、Zn、Cd、In、Pb、Bi	液态	在HCl中氯化蒸馏、富集系数为15～30，Sn以$SnCl_4$挥发分离出基体Sn	0.1～10
Si SiO_2 $SiHCl_3$	液态	Mg、Ca、Ba、Al、Ti、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ag、Mo、Cd、Sn、Pb、Bi、Sb、V	液态	在$HF+HNO_3+H_2SO_4$中蒸馏，SiF_4挥发，富集系数为20～30；或用$HF+HNO_3$处理或直接用HF蒸气处理，挥发SiF_4	0.1～10
Au	液态	Mg、Ca、Ba、Al、Ti、V、Cr、Mo、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ag、Zn、Cd、Sn、Pb、Sb、Bi	液态	在HCl中、还原成金属硫化物挥发、富集系数为10、分离基体Au	0.1～10
As	固态	多种元素	固态	用卤气处理、挥发砷的卤化物分离基体As	
As	固态	多种元素	固态	在220℃使As氧化成As_2O_3挥发、分离基体As	
Sb	固态	多种元素	固态	卤化处理、挥发Sb的卤化物分离基体Sb	
V	固态	多种元素	固态	用气态氯氟化处理、挥发V的氯化物、分离基体V	
Re	固态	多种元素	固态	使Re氧化、挥发Re_2O_3、分离基体Re	

（三）直接光谱分析法

1. 载体蒸馏法

载体蒸馏法是利用样品各组分挥发性的差异，在蒸发行为上所表现的分馏特性，选择合

适的途径实现分馏效应的利用和控制，以达到分离目的。载体种类及用量的选择是本法的核心，是保证分析检出限，精密度和准确度的关键。常用载体有两类：一类是氧化镓类型载体，即非化学活性载体；另一类是氯化银类型载体，即化学活性载体。载体蒸馏法是通过下述途径实现分馏效应的利用与控制的。

(1) 先把样品转化为难挥发的化合物，以保证欲分析杂质元素与基体成分蒸气压差别最大。

(2) 于样品中加入少量经特殊选择的载体，以促进杂质与基体成分的分步蒸馏。

(3) 用电弧光源，在特殊形状的大孔径电极（杯状电极）上直接进行样品的蒸发和杂质光谱的激发。

载体蒸馏法主要适用于难熔、难挥发物料中痕量杂质的测定。

2. 电弧浓缩法

电弧浓缩法与载体蒸馏法的区别，在于加有缓冲指示剂，样品和载体分层置于特殊电极中，在高度稳定的条件下，充分利用样品组分的分馏效应将基体成分挥发去掉，使待测难挥发元素在燃弧过程中逐渐渗入载体层，得到充分富集，然后直接进行载体层的光谱分析。浓缩终点，由“指示元素”的电弧像颜色变化来判断。

3. 加罩电极法

加罩电极法是由载体蒸馏法和电弧浓缩法结合在一起的一种电弧发射光谱分析法。其装置是由杯状电极和带气孔的外罩两部分组成。混有载体或缓冲剂的样品置于电极孔穴中，在电弧加热下，分析物蒸气从外罩的小孔逸出，进入电弧等离子体进行激发，加罩电极法的特点是能更有效地控制和利用分馏效应，同时适用于易挥发元素，中等挥发元素和难挥发元素的分析。表 4-7 为各类分馏发射光谱分析方法检出限的比较。

表 4-7 各类分馏发射光谱分析方法检出限 $[w/(\mu g \cdot g^{-1})]$[1]比较

元素	加罩电极法(200mg)	电弧浓缩法(60mg)	载体蒸馏法(100mg)	蒸发法(50mg)
易挥发元素				
Ag	<0.03		0.05	0.1
As	2.8		5	10
B	3.0		0.03	0.1
Bi	0.03		0.5	0.04
Cd	0.1		0.07	0.02
Ga	<1.7		载体	—
Ge	<0.096		0.2	0.3
Hg	0.21		10	
In	0.021		0.5	0.3
Pb	<0.3		1	0.4
Sb	0.37		10	2
Sn	0.13		1	0.2
Te	0.37		—	—
Tl	0.027		3	—
Zn	<3		10	2
中等挥发元素				
Ba	<1		10 (非灵敏线)	—
Be	0.41		0.1	0.1
Co	0.8		1	0.5
Cr	<1		3	0.2
Cu	0.3		0.3	0.2
Fe	<10 (非灵敏线)		1	1
Li	7.2		0.1	0.02
Mn	10 (非灵敏线)		1	0.1
Ni	1		2	1
Sr	<1		—	—
Yb	0.36		—	—
难挥发元素				
Ce	10	10		
Dy		10		
Hf		3		
La	3.6	1		
Lu		10		
Mo	0.45	1		
Nb	0.8	3		
Nd		3		
Sc	0.5 (非灵敏线)	<1		
Ta		5		
Th	6	10		
Ti	300 (非灵敏线)	1	3	10
U		30	基体	基体
V	1 (非灵敏线)		5	10
W	4.0	10		
Y	1.0	1		
Zr	<1	3		

（四）色谱-等离子体发射光谱法联用技术

色谱与等离子体发射光谱法联用技术可分为GC-PAES和LC(HPLC)-PAES两大类，前者包括GC-ICP-AES、GC-MWP-AES和GC-DCP-AES，后者包括HPLC-ICP-AES、HPLC-MWP-AES、GPC-ICP-AES和TLC-MIP-AES等。各类色光联用技术均有各自的特点和应用范围。下面简要介绍GC-PAES和HPLC-PAES。

1. GC-PAES联用技术

GC的流动相一般是Ar、He、H_2、N_2等气体。由色谱柱出来的流出物直接进入ICP放电通道中，进行原子化和激发，并发射出相应的辐射信号，然后用多道直读光谱仪等进行检测。GC-PAES适用于沸点小于450℃的挥发性有机物和金属螯合物的分析。

2. HPLC-PAES联用技术

HPLC流出物是液体，用适当溶剂稀释，雾化后导入等离子体放电通道中。HPLC适用于不挥发的、极性的、热不稳定的和离子型化合物，以及高聚物等的分析，因而比GC有着更广泛的用途。

三、分离富集-AES法的应用与进展

表4-8 萃取-AES法的应用

测定元素	样品	萃取方法	萃取体系	检测方法	检出限	文献
As	土壤	溶剂萃取	二硫代氨基甲酸酯	ICP-AES	—	1
As	合金，生物标准材料	连续流动萃取	二甲苯	氢化物发生-ICP-AES	—	2
Cd	生物样品	溶剂萃取	DDTC-四氯化碳	AES	—	3
B	天然水	溶剂萃取	2,6-甲基庚酮-4-2-乙基己二醇	ICP-AES	$0.35ng\cdot ml^{-1}$	4
B	水	溶剂萃取	含10%季铵氯化物336的二甲苯溶液	ICP-AES	$28\mu g\cdot L^{-1}$	5
B	土壤	液固萃取	$CaCl_2$	ICP-AES	—	6
B	二氧化硅，硅	溶剂萃取	乙基紫 甲苯	电热蒸发ICP-AES	$1ng\cdot ml^{-1}$	7
Ba	NaCl，$NaNO_3$	溶剂萃取	噻吩甲酰丙酮-二苯并-18-冠醚-6	火焰AES	—	8
Be	Al-Mg合金	微孔萃取	微孔PTFE管	ICP-AES	1.2ng	9
Be	—	溶剂萃取	乙酰丙酮-苯	ICP-AES	$1ng\cdot ml^{-1}$	10
Cd	—	溶剂萃取	HI-辛硫醚	AES	—	11
Cr	B-$CaCrO_4$焰火混合物	溶剂萃取	2-噻吩甲酰三氟丙酮-二甲苯	ICP-AES	—	12
Fe	—	溶剂萃取	5-碘代水杨酸-丁醇或戊醇	DCP-AES	$9\mu g\cdot g^{-1}$	13
Ga	铝合金	溶剂萃取	黄原酸钾-二甲苯	ICP-AES	—	14
Hg	水	溶剂萃取	二安替比林硫脲	AES	$0.26\mu g\cdot L^{-1}$	15
I，IO_3^-	水	溶剂萃取	二甲苯	ICP-AES	$1.6ng\cdot ml^{-1}$	16
Mo	岩石	溶剂萃取	黄原酸钾-二甲苯	ICP-AES	$1.8ng\cdot ml^{-1}$	17
Ni	生物材料	溶剂萃取	丁醇	ICP-AES	$0.2ng\cdot ml^{-1}$	18
Ni	生物材料	溶剂萃取	1,5-双（二-2-吡啶亚甲基）硫代对称二氨基脲-MIBK	ICP-AES	$0.5ng\cdot ml^{-1}$	19
P	河水、海水	溶剂萃取	钼酸盐-酒石酸锑钾-异丁酮	ICP-AES	$0.37ng\cdot L^{-1}$	20
PO_4^{3-}	天然水	溶剂萃取	钼酸铵-辛烷	ICP-AES	$0.05\mu g\cdot ml^{-1}$	21
Pt	催化剂	溶剂萃取	邻烷基二硫代甲酸钾	ICP-AES	—	22
Rh	催化剂	溶剂萃取	黄原酸钾-二甲苯	ICP-AES	$19ng\cdot L^{-1}$	23

续表

测定元素	样品	萃取方法	萃取体系	检测方法	检出限	文献
Tl	天然水	溶剂萃取	ADPC 和 HMAHMDC-DIBK	ICP-AES	1.3ng·ml^{-1}	24
Th	独居石，磷钇矿，磷灰石	溶剂萃取	3-甲基-1-苯基-4-三氟乙酰吡唑啉酮-5-丁醚	ICP-AES	—	25
Re	岩石	溶剂萃取	丙酮	ICP-AES	25ng·ml^{-1}	26
Mo	氧化钨	溶剂萃取	二甲基二硫代氨基甲酸-氯仿	交流电弧 AES	灵敏度 0.0001%～0.001%	27
Sc	磷酸盐矿	溶剂萃取	3-甲基-1-苯基-4-三氟乙酰吡唑啉酮-5-丁醚	ICP-AES	约 1μg·L^{-1}	28
Sm	磷灰石矿	溶剂萃取	双（2-乙基己基）磷酸酯-环辛烷	ICP-AES	0.30μg·ml^{-1}	29
V	铁	溶剂萃取	*N*-苯甲酰基-*N*-苯胺-氯仿	ICP-AES	0.1μg	30
表面活性剂	水	溶剂萃取	Cu（Ⅰ）-1，10-菲咯啉-甲基异丁基酮	ICP-AES	4.8μg·L^{-1}	31
Nb，Ta	土壤，化探样品	溶剂萃取	甲基异丁基酮-磷酸三丁酯	ICP-AES	—	32
La，Y	稀土混合物	溶剂萃取	PMBP-乙酸丁酯	ICP-AES	La5.5ng·ml^{-1}，Y0.28ng·ml^{-1}	33
W，Mo	化探样品	溶剂萃取	硫氰酸盐-甲基异丁基酮	ICP-AES	W0.01μg·ml^{-1}，Mo0.005μg·ml^{-1}	34
Th，U	煤灰	溶剂萃取	2-噻吩甲酰三氟丙酮	ICP-AES	Th11，U29μg·L^{-1}	35
Ba，Ca，Sr	碱液	溶剂萃取	4-苯甲酰-3-甲基-1苯基吡唑啉酮-氯仿-异戊醇	AES	—	36
Nb，Cr，Fe，Mo，Mn	钢	电解萃取	乙酰丙酮-氯化四甲铵-甲醇	ICP-AES	—	37
Pd，Rh，Ru	铀	溶剂萃取	磷酸三丁酯-己烷	AES	—	38
Ir，Rh，Pd，Pt	—	溶剂萃取	4-辛基氨基吡啶-氯仿	ICP-AES	依次为 0.029，0.11，0.024，0.073μg·ml^{-1}	39
Pt，Pd，Ag	铂矿石	溶剂萃取	*N*，*N*-二苯基硫脲和三苯膦-二氯乙烷	ICP-AES	—	40
As，Co，Fe，Mn，Al，Ni，Bi，Cu，In，Ag	高纯铌	溶剂萃取	二乙胺二硫代磷酸钠-氯仿	直流电弧 AES	—	41
Au，Pt	—	溶剂萃取	十四烷基二甲基苄基铵-氯仿	ICP-AES	Au2.7ng·ml^{-1}，Pt5.8ng·ml^{-1}	42
P，Pb，Ni，Ta，Ti，Zr，Al，Na，Li	硝酸钚	溶剂萃取	三辛胺-二甲苯	ICP-AES	—	43
La，Ce，Pr，Nd，Sm，Y，Ga	钢	溶剂萃取	BPHA-MIBK	ICP-AES	依次为 8，45，42，42，22，1.9，22μg·L^{-1}	44
Bi，Co，Fe，In，Mn，Ni，Pb，Cu，Sb，Zn	磷酸，磷酸铵	溶剂萃取	吡咯烷-1-二硫代羧酸铵，8-羟基喹啉-乙酸乙酯	AES	—	45
Cd，Co，Cr，Cu，Fe，Hg，Mn，Ni，Pb	试剂级钠盐	固相萃取	六亚甲基二硫代氨基甲酸铵-聚亚胺酯泡沫填充柱	ICP-AES	Cd5μg·ml^{-1}，Cu10μg·ml^{-1}，Fe10μg·ml^{-1}，Mn5μg·ml^{-1}，Ni20μg·ml^{-1}，Pb100μg·ml^{-1}	46
Cr（Ⅵ），总 Cr	水样	溶剂萃取	TBP	ICP-AES	Cr（Ⅵ）1.0μg·L^{-1}，总 Cr0.9μg·L^{-1}	47
Sn，Mo，Cd，Pb，Co，Ni，Fe，B，Si，Mn，Cr，Mg，V，Be，Cu，Ca，Al	U_3O_8	溶剂萃取	D2EHP-环己烷	ICP-AES	依次为 5.4、1.0、1.6、12.5、1.3、4.7、1.8、1.8、6.8、0.7、5.4、1.1、1.3、0.2、2.0、4.4、5.3μg·L^{-1}	48
Al，Ba，Be，Ca，Co，Cr，Mg，Mn，Sr，Ni，Ti，V，Y，Eu，Na，K，Li，Rb	碲化锡，碲化铅	萃取色谱	TBP-三辛胺柱	AES	依次为 500、200、2、200、8、10、200、2、200、20、100、30、50、50、500、600、200、1000μg·L^{-1}	49
Ta，Nb，Zr，Ti	U_3O_8	萃取色谱	7402 季胺-Kel-F 粉柱	ICP-AES	依次为 Ta0.02，Nb0.02，Zr0.004，Ti0.002μg·ml^{-1}	50

续表

测定元素	样品	萃取方法	萃取体系	检测方法	检出限	文献
Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, Ti, V, Zn	二氧化铀	萃取色谱	Cl-TBP 萃淋树脂	ICP-AES	依次为 10、12、1.4、2、3.4、4.8、4.4、0.2、1.6、4、3.8、14、16、2.4、6.4、0.6μg·L^{-1}	51
Al, Cr, Fe, Mg, P, Pb, Ti, V, W	U_3O_8	萃取色谱	7402 季胺-Kel·F 粉柱	ICP-AES	依次为 0.8、0.08、0.24、0.008、0.8、0.8、0.08、0.08、0.4μg·g^{-1}	52

本表参考文献：

1 Huang Y Q, Wai C M. Commun Soil Plant Anal, 1986; 17(2): 125
2 Menendez G A, Sanchez Uria J E, Sanz-Medel A. J Anal At Spectrom, 1989; 4(7): 581
3 Kumamaru T, Nitta Y, Nakata F et al. Anal Chim Acta, 1985; 174: 183
4 Miyazaki A, Bansho K. Anal Sci, 1986; 2(5): 451
5 Novozamsky I, Van Eck R, Houba V J G et al. At Spectrosc, 1990; 11(2): 83
6 Jeffrey A J. Mccallum L E. Commun Soil Sci Plant Anal, 1988; 19(6): 663
7 三笠博司，白水正树，堀良万. 分析化学（日），1991；40(11):749
8 Billah M, Honjo T et al. Fresenius' J Anal Chem, 1993; 347(3/4): 107
9 Yamamoto M, Obata Y, Nitta Y et al. J Anal At Spectrom, 1988; 3(3): 441
10 Buhl F, Galas W. Fresenius' Z Anal Chem, 1988; 332(4): 366
11 Веревин Г В, Кулиш Н Г, Матвеева В В…. Ж анал хим, 1988; 43(1): 70
12 Whiteley R V, jun, Merrill R M, Fresenius' Z Anal Chem, 1982; 311(1): 37
13 Lajunen L H J, Makarainen V, Aitta E. Finn Chem Lett, 1984; (6): 139
14 渡部英雄，相原将人，木卜光夫. 分析化学（日）; 1990; 39(10): T135
15 Торопов Л Н, Дегтев М Н, Махнев Ю А. Ж анал хим. 1990; 45(12): 2432
16 Miyazaki A, Bansho K. Spectrochim Acta Part B, 1987; 42B(1/2): 227
17 渡部英雄，相原将人，木卜光夫. 分析化学（日），1988; 37(4): 180
18 Vereda A E, Garcia de T A et al. Analyst, 1992; 117(7): 1157
19 Vereda A E, Sanchez R F, Chakrabarti A K et al. Fresenius' J Anal Chem, 1991; 340(4): 262
20 Miyazaki A, Kimura A, Ume Z Y. Anal Chim Acta, 1981; 127: 93
21 藤野治、吉贺康夫，平木敬三. 分析化学（日），1991; 40(1): 19
22 渡部英雄，相原将人，木卜光夫. 日本化学会志，1991; (11): 1491
23 渡部英雄，相原将人，木卜光夫. 分析化学（日），1990; 39(5): T61
24 宫崎章、三瓶贵弘，田尾博明等. 日本化学会志，1992; (3):307
25 藤野治，松井正和，梅谷重夫等. 日本化学会志，1989; (1): 39
26 Bozhkov O D, Iordanov N, Borisova L et al. Fresenius' Z Anal Chem, 1985; 321(5): 453
27 Авраменко Л Н, Гудзенко Л В, Золотовицкая Э С…. Ж анал хим. 1992; 47(4): 737
28 藤野治，平木敬三，松井正和. 分析化学（日），1986; 35(8): 657
29 藤野治，米谷欣宜，杉山雅人等. 分析化学（日），1984; 33(9): 465
30 Danzaki Y. Fresenius' J Anal Chem, 1992; 342(1/2): 103
31 Pressouyre B. Analusis, 1989; 17(6): 346
32 金泽祥，汤志勇，黄荷等. 理化检验（化学分册），1989; 25(5): 289
33 陈建国，江祖成，孔令英. 光谱学与光谱分析，1990; 10(6): 59
34 汤志勇，金泽祥，李桂香等. 光谱学与光谱分析，1991; 11(3): 33
35 Kamata E, Nakashima R, Furukawa M. J Anal At Spectrom, 1987; 2(3): 321
36 Лозовик А С, Оврушкий М Н, Говбис Н Б…. Завод лаб, 1988; 54(5): 17
37 Kurosawa F, Tanaka I S K, Otsuki T. Spectrochim Acta Part B, 1981; 36(7): 727
38 Capdevila C, Alduan F A. Junta Energ Nucl, 1980; 468; 9
39 Серегина И Ф, Бухбиндер Г Л, Шабанова Л Н…. Ж анал хим, 1986; 41(5): 861
40 Seeverens P J H, Klaassen E J M, Maessen F M J. Spectrochim Acta Part B, 1983; 38(5/6): 727
41 翰晟. 上海金属，1986; 7(6): 60
42 熊丸尚宏，新田阳子，松尾博等. 分析化学（日），1985; 34(11): 671
43 Ko R. Appl Spectrosc, 1984; 38(6): 909
44 尹志辉，张亚杰. 分析化学，1995; 23(1): 1292
45 Khavezov I, Ivanova E, Koehler P et al. Fresenius' Z Anal Chem, 1987; 326(6): 536
46 Alexandrova A. Arpadjan S. Analyst, 1993; 118(10): 1309
47 Jamshid L M, Farzaneh S. J Anal At Spectrom, 1995; 10(10): 881
48 Marin S, Cornejo S, Jara C et al. Fresenius' J Anal Chem, 1996; 355(5/6): 680
49 Гражулене С С, Заднепрук Л В, Попандопуло Ю Н. Ж анал хим, 1989; 44(8): 1495
50 刘虎生，冯 斌，潘产林. 光谱学与光谱分析，1988; 8(2): 47
51 刘虎生，关景素. 光谱学与光谱分析，1991; 11(3): 28
52 刘虎生，冯 斌，潘彦林. 分析化学，1991; 19(2): 203

表 4-9 离子交换-AES 法的应用

测定元素	样 品	离子交换树脂	洗脱剂	检测方法	检 出 限	文献
Al	葡糖酸钙	8-羟基喹啉纤维素	2mol・L^{-1}HCl	ICP-AES	0.1μg・g^{-1}	1
B	—	Amberlite XA-743	1mol・$L^{-1}HNO_3$	ICP-AES	—	2
B	二硅化铁 高纯铁	阴离子交换树脂	2mol・$L^{-1}HNO_3$	ICP-AES	—	3
B	河水，标准钢	Amberlite XE-243	0.5mol・L^{-1}HCl	ICP-AES	0.012μg・g^{-1}	4
B	U，U_3O_8	阳离子交换树脂	—	交流电弧 AES	—	5
Cd	生活污水污泥	—	—	ICP-AES	—	6
Co	高纯镍	—	—	ICP-AES	—	7
Cr	气载颗粒	阴离子交换树脂	—	ICP-AES	7ng・ml^{-1}	8
S	煤	阳离子交换树脂	—	ICP-AES	—	9
La，Ce，Nd，Sm，Eu，Gd，Dy，Yb，Lu	比利时南部沉积物	Dowex 50W-X8	—	ICP-AES	—	10
Cd，Cu，Fe，Mn，Ni，Zn		Amberlite XAD-2	2mol・L^{-1} HCl-0.1mol・$L^{-1}HNO_3$	ICP AES	依次为 12，18，24，4，60，30ng・L^{-1}	11
Cd，Co，Cr，Cu，Fe，Mg，Ni，Ti，Zn，Mn	铝合金	Hyphan	2mol・L^{-1}HCl	ICP-AES	依次为 70，40，30，7，8，60，20，40，30，20 μg・g^{-1}	12
W，Ti，Mg，Mn，Cr，Ta，Fe，Mo	高纯铌	阴离子交换树脂	HCl-HF，H_2SO_4-H_2O_2	ICP-AES	依次为 15，0.9，0.12，0.3，5.1，13，2.7，10 ng・ml^{-1}	13
As，Se，Mo，S，Cr	土壤、头发、牛肝粉	阴离子交换树脂	0.5mol・$L^{-1}NH_4Cl$-3mol・$L^{-1}NH_3$・H_2O	ICP-AES	依次为 13.0，25.2，2.04，6.19，3.64μg・L^{-1}	14
Au，Pt，Pd	—	P-TO	2mol・L^{-1}HCl，5%硫脲和 0.1mol・L^{-1} HCl	DCP-AES	—	15
Cu，Pb	—	PTFE	—	ICP-AES	Cu1.5ng・ml^{-1}，Pb38ng・ml^{-1}	16
Al，Ti，V，Mn，Fe，Co，Ni，Cu，Zn，Y，Mo，Cd，Pb	海水	Chelex-100	2mol・$L^{-1}HNO_3$	ICP-AES	依次为 0.18，0.0016，0.04，0.008，0.02，0.03，0.1，0.01，0.02，0.006，0.03，0.03，0.15μg・L^{-1}	17
Ta，Nb	岩石水系沉积物	—	—	ICP-AES	Ta0.2μg・g^{-1}，Nb0.4μg・g^{-1}	18
AsO_4^{3-}，硼酸盐，CrO_4^{2-}，MoO_4^{2-}，PO_4^{3-}，SeO_4^{2-}，VO_3^-	—	活性氧化铝吸附含氧阴离子	NH_3-KOH	ICP-AES	—	19
Gd，Sm，Dy	Zr-Nb 合金	阳离子交换树脂	—	ICP-AES	—	20
U，Cd，Mo，Bi	岩石水系沉积物	阴离子交换树脂	—	ICP AES	—	21
Gr，Ti，V，Fe，Al	—	Muromac A-1 螯合树脂	HNO_3	ICP-AES	依次为 0.21，0.08，0.15，0.11，1.5μg・L^{-1}	22
Au，Pd，Pt	地质样品	阴离子交换树脂	—	AES	—	23
Au，Pd，Pt	地质样品	PTD	2mol・$L^{-1}HClO_4$，5%硫脲和 0.1mol・L^{-1}HCl	DCP-AES	Au0.09μg・g^{-1}，Pd 0.08μg・g^{-1}，Pt0.1 μg・g^{-1}	24
Cr，Cd，Co，Cu，Pb，Zn，Bi，Ga，La，Mn，Ni，Fe，Ti，V	—	亚氨基二乙酸-乙基纤维素	—	ICP-AES	—	25
Ca，Mg	钨酸钠	阳离子交换树脂	0.010mol・L^{-1} EDTA	ICP-AES	Ca0.002mg・L^{-1}，Mg0.001mg・L^{-1}	26

续表

测定元素	样品	离子交换树脂	洗脱剂	检测方法	检出限	文献
Zr, Hf, Nb, Ta	岩石	—	—	ICP-AES	—	27
Al, Am, B, Ba, Be, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Eu, Fe, Ga, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, Pb, Pr, Sm, Sn, Sr, Ti, V, Y, Zn, Zr	金属环	阴离子交换树脂	$8mol \cdot L^{-1}HNO_3$	ICP-AES	依次为19, 5.4, 14, 0.2, 0.8, 0.4, 2.8, 46, 20, 3.7, 1.1, 3.6, 5.1, 14, 43, 7.9, 0.8, 0.4, 0.8, 5.8, 13, 37, 11, 41, 31, 10, 25, 0.1, 1.1, 2.2, 1.2, 4.9, $1.1\mu g \cdot g^{-1}$	28
La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Er, Yb	地质试样	—	—	ICP-AES	—	29
Co, Mo, V	矿质水	—	—	ICP-AES	—	30
La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Yb, Lu	美国地质勘探局标准样品	Dowex50-WX8	$1.75mol \cdot L^{-1}HCl$	ICP-AES	—	31
Ca, Mg, K, Na, Al, P, S	土壤	Amberlite IRA 400	$1 mol \cdot L^{-1}NH_4Cl$	ICP-AES	依次为0.002, 0.008, 0.035, 0.019, 0.008, 0.020, $0.010\mu g \cdot ml^{-1}$	32
Cr, V, Ti, Be, Y, La, Cu	—	螯合树脂	$6mol \cdot L^{-1}HCl$	ICP-AES	单位为 $ng \cdot L^{-1}$	33
Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn	江水，海水	Amberlite XAD-2	$2mol \cdot L^{-1}$ HCl-$0.1mol \cdot L^{-1}HNO_3$	ICP-AES	$Cd8ng \cdot L^{-1}$, $Cu12ng \cdot L^{-1}$, $Fe12ng \cdot L^{-1}$, $Mn2ng \cdot L^{-1}$, $Zn12ng \cdot L^{-1}$	34
Cd, Co, Cu, Pb, Sn, Zn, Zr	地质标样	阴离子交换树脂	HCl	ICP-AES	依次为6, 5, 15, 70, 50, 30, $7\mu g \cdot ml^{-1}$	35
Gd, Sm, Dy, Eu	硫酸锰	阳离子交换树脂	$6mol \cdot L^{-1}HCl$	ICP-AES	—	36
Se (Ⅳ), Se (Ⅵ)	—	阴离子交换树脂	$0.5m mol \cdot L^{-1}$邻苯二甲酸氢钾	ICP-AES	Se (Ⅳ) $1.6ng \cdot L^{-1}$, Se (Ⅵ) $2.5ng \cdot L^{-1}$	37
P	铜基合金	阴离子交换树脂	$1.5mol \cdot L^{-1}NaOH$	DCP-AES	—	38
Pt, Pd	地质试样	阳离子交换树脂	$0.18mol \cdot L^{-1}HCl$	ICP-AES	$Pt50\mu g \cdot L^{-1}$, $Pd40\mu g \cdot L^{-1}$	39
As, Se, Cr	水	—	$5mmol \cdot L^{-1}$碳酸铵-$5mmol \cdot L^{-1}$碳酸氢铵	ICP-AES	$As10\mu g \cdot L^{-1}$, $Se4\mu g \cdot L^{-1}$, $Cr2\mu g \cdot L^{-1}$	40
Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, V, Ti, W, Zr, Nb, Mo, Ta	镍基和钴基耐热合金	MCI Gel CA08P 强碱阴离子交换树脂	HF-HCl, HF-HCl-HNO_3, $HClO_4$-HF-H_2O_2	ICP-AES	—	41
Cr (Ⅲ), Cr (Ⅵ)	废水	TSKgel IC-Anion-PW 阴离子树脂	$0.5mmol \cdot L^{-1}$邻苯二甲酸氢钾-NaOH	ICP-AES	Cr (Ⅲ) 7.5ng, Cr (Ⅵ) 22ng	42

本表参考文献：

1 Narayanan P, Csanady G, Wegscheider W et al. J Anal At Spectrom, 1989; 4(4): 347
2 Anderson D R, Mcleod C W. Anal Proc, 1988; 25(3): 67
3 Yamada K, Yamaguchi H, Kujirai O et al. Mater Trans JIM, 1991; 32(5): 480
4 高桥保夫. 分析化学(日), 1987; 36(11): 693
5 关景素, 高炳华, 姬俊英. 原子能科学技术, 1989; 23(3): 40
6 Taylor P, Desmet B, Dams R. Bull Soc Chim Belg, 1986; 95(5/6): 295
7 Taylor P, Desmet B, Dams R. Anal Lett, 1985; 18(A19): 2477
8 Ehman D L, Anselmo V C, Jenks J M. Spectroscopy, 1988; 3(2): 32
9 Eames J C, Cosstick R J. Analyst, 1992; 117(10): 1581
10 Roelandts I, Deblond A. Chem Geol, 1992; 95(1/2): 167
11 Porta V, Sarzanini C et al. Anal Chim Acta, 1992; 258(2): 237
12 Dumont J, Cote M, Hubert J. Appl Spectrosc, 1989; 43(7): 1132
13 Imakita T, Fudagawa N, Kubota M. Analyst, 1990; 115(9): 1185
14 刘　峻, 陈维杰, 赵承易. 分析化学, 1993; 21(3): 328
15 Grote M, Kettrup A. Fresenius' Z Anal Chem, 1987; 327(1): 11
16 Kumamaru T, Murakami K, Nakata F et al. Anal Sci, 1987; 3(2): 161
17 Cheng C, Akagi T, Haraguchi H. Anal Chim Acta, 1987; 198: 173
18 邹骏城, 陶德刚. 岩矿测试, 1986; 5(1): 55
19 Cook I G, Mcleod C W, Worsfold P J. Anal Proc, 1986;

23(1)：5
20 关景素，姬俊英，徐爱民等. 原子能科学技术，1986；20(2)：238
21 黄会萍，黄福实，陈红陵. 岩矿测试，1986；5(1)：41
22 Hirata S, Umezaki Y, Ikeda M. Anal Chem, 1986; 58(13)：2602
23 曹淑琴，李滦宁等. 光谱实验室，1995；12(5)：31
24 Grote M, Ketrrup A. Anal Chim Acta, 1987; 201：95
25 Horvath Z, Barnes R M, Murty P S. Anal Chim Acta, 1985; 173：305
26 付穗珠，陈元清，张济南. 分析测试通报，1991；10(1)：56
27 郑永凤，张 晨. 铀矿地质，1991；7(5)：308
28 Huff E A, Bowers D L. Appl Spectrosc, 1989; 43(2)：223
29 Ефремова Л Е, Сорокина Н А. Ж анал хим, 1991; 46(11)：2259
30 Steffan I, Vujicic G. Mikrochim Acta, 1993; 110(1/3)：89
31 Roelandts I. At Spectrosc, 1988; 9(2)：49
32 Somasiri L L W, Birnie A, Edwards A C. Analyst, 1991; 116(6)：601
33 Su Z X, Chang X T et al. Microchem J, 1991; 44(1)：78
34 Porta V, Sarzanini C et al. J Anal At Spectrom, 1992; 7(1)：19
35 Wittmann A A, Kop F R. Spectrochim Acta Part B, 1987; 42B(1/2)：417
36 关景素，姬俊英，刘英梅等. 原子能科学技术，1992；26(1)：80
37 中田文夫，砂原广志，松尾博等. 分析化学(日)，1986；35(5)：439
38 Epstein M S, Koch W F, Epler K S et al. Anal Chem, 1987; 59(24)：2872
39 Brown R J, Biggs W R. Anal Chem, 1984; 56(4)：646
40 Gjerde D T, Wiederin D R et al. J Chromatogr, 1993; 640(1/2)：73
41 Kohri M, Kujirai O, Yamada K et al. Anal Sci, 1988; 4(3)：293
42 Nakata F, Hara S, Matsuo H et al. Anal Sci, 1985; 1(2)：157

表 4-10 沉淀与共沉淀-AES 法的应用

测定元素	样品	沉淀剂	沉淀方法	检测方式	检出限	文献
Ta	铌基合金	氯化四苯砷	沉淀	ICP-AES	—	1
Al, Ag, Cd, Cu, Mn, Fe, Bi, Pb, Hg	硫酸镍	NiS	共沉淀	AES	…	2
Pb, Bi, Ga, In	废水	豆乳和丹宁酸	沉淀	AES	依次为 0.5，0.25，0.20，0.50μg·dl^{-1}	3
La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Y	磷灰石氟碳酸铈镧矿	氢氧化物	沉淀	ArICP-AES	依次为 20，120，60，70，100，3，100，6ng·ml^{-1}	4
Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, La, Pb	海水	镓	共沉淀	ICP-AES	5～150ng·L^{-1}	5
Ti, V, Zr	铝	氢氧化镧	共沉淀	ICP-AES	Ti0.008μg·ml，V0.04μg·ml，Zr0.02μg·ml^{-1}	6
B	复方奎宁注射液	四苯硼钠	沉淀	ICP-AES	…	7
F, Hg, S	·	Ag, Al_2O_3, MgO, ZnO_2	沉淀	AES	F0.5nmol，Hg0.2nmol，S0.1nmol	8
阿托品	药品	磷钼酸	沉淀	FIA-ICP-AES	…	9
Ba, Ca, Fe, Mg, Mn, Ni, Sr, Ti, Zn, Al, Cr	高纯氮化硅	氢氧化镧	共沉淀	ICP-AES	依次为 0.1，0.1，0.4，0.1，0.1，0.1，0.6，0.1，0.2，0.4，0.6，0.4μg·g^{-1}	10
Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti, V, Zn, Zr	高纯钼三氧化钼	La	共沉淀	ICP-AES	依次为 0.1，0.05，1.9，0.8，0.03，0.4，0.04，0.04，0.2，0.03μg·g^{-1}	11
As, Bi, Pb, Se, Sn, Te	铜	氢氧化镧	共沉淀	ICP-AES	1～2ng·ml^{-1}	12
V	高纯氧化钇	—	共沉淀	ETP-ICP-AES	—	13
Cu	水	氢氧化铟	共沉淀	ICP-AES	—	14
Pb	锌、锌铝合金	MnO_2	共沉淀	ICP-AES	—	15
Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Y, V, Mo, Cd	海水	镓	共沉淀	ICP-AES	依次为 0.35，0.05，0.15，0.04，0.05，0.11，0.32，0.016，0.015，0.45，0.04，0.45，3，0.24μg·L^{-1}	16
Co, Cu, Fe, Mg, Ni, Ti, Zr	金属钒，V-Al合金	氢氧化铋	共沉淀	ICP-AES	—	17
Fe, Ni, Mn, Cu, Co, Mg, Sn, Cr	高纯钛	铋和镧氢氧化物的混合物	共沉淀	ICP-AES	Fe1.80μg，Ni0.36μg，Cu0.50μg，Co0.10μg，Mg0.08μg	18

续表

测定元素	样 品	沉淀剂	沉淀方法	检测方式	检 出 限	文献
Mg，Ca，V，Cr，Mo，Mn，Fe，Cu，Zn，Si，Al，Pb，Sr，Ba，P	白钨矿	—	沉淀	ICP-AES	—	19
Lu，Yb，Ga，Ho，Tm，Tb，Dy，Sc，Er，Y，Eu，La，Nd，Ce，Pr，Sm	地球化学样品	铜铁试剂	沉淀	ICP-AES	(0.008～0.04) mg·L^{-1}	20

本表参考文献：

1 郭汉文，张功杼，袁广維. 理化检验（化学分册），1991；27(3)：163
2 Aleksandrov S，Vasileva E. Dokl Bolg Akad Nauk，1987；40(10)：75
3 Luo X Y，Zhan G Y，Chang X J. Lan-chou Ta Hsueh Hsueh Pao，1981；(1)：83
4 Kanicky V，Toman J，Malecek M et al. Chem Listy，1987；81(12)：1304
5 Akagi T，Fuwa K，Haraguchi H. Anal Chim Acta，1985；177：139
6 原田芳文，倉田奈津子. 分析化学（日），1985；34(4)：175
7 陈 炜，江祖成等. 光谱实验室，1995；12(5)：42
8 Macho K，Garten R P H，Klockow D et al. SIA Surf Interface Anal，1988；12(11/12)：574
9 陈 炜，江祖成，陈 浩等. 分析科学学报，1993；9(4)：25
10 原田芳文，倉田奈津子，古野义一. 分析化学（日），1990；39(1)：49
11 Kujirai O，Yamada K，Kohri M et al. Fresenius' J Anal Chem，1991；339(3)：133
12 Fukaya T，Takeya M et al. Anal Sci，1993；9(5)：727
13 胡 斌，曾纪铭等. 中国稀土学报，1995；13(2)：163
14 Hiraide M，Ozaki N et al. Anal Sci，1993；9(3)：367
15 吉川裕泰，秋吉孝则，塚田纲二. 分析化学（日），1991；40(10)：T175
16 Akagi T，Haraguchi H. Anal Chem，1990；62(1)：81
17 吉川裕泰，矶部健，岩田英夫等. 分析化学（日），1989；38(10)：535
18 吉川裕泰，石桥耕一，郡司直树. 分析化学（日），1990；39(2)：829
19 张 静. 岩矿测试，1991；10(1)：41
20 梁术廷，薛章礼. 分析测试通报，1992；11(2)：44

表 4-11 色谱-PAES 联用技术的应用

测定对象	样 品	分离方法	检测方法	检出限	文献
丁基锡化合物	沉积物，生物材料	毛细管气相色谱	ICP-AES	—	1
Cu，Ni	—	毛细管气相色谱	MIP-AES	—	2
C，H，N，O，F，Cl，Br，S	—	气相色谱	傅里叶变换红外-近红外-AES	—	3
有机 Pb	自来水，雪	气相色谱	AES	—	4
Be（Ⅱ），Be（Ⅰ），Cr（Ⅱ），Cr（Ⅰ）	—	气相色谱	ICP-AES	Be0.1pg，Cr9pg	5
甲基汞	鱼	气相色谱	DCP-AES	0.0375ng·μl^{-1}	6
C，H，Cl，Br	氯代烃，溴代烃	气相色谱	MIP-AES	依次为 1，7，9，4 pg·S^{-1}	7
Be	天然水	气相色谱	MIP-AES	10pg	8
F	水，尿	气相色谱	MIP-AES	7.5μg·S^{-1}	9
甲基氯化汞，乙基氯化汞，二甲基氯化汞	海水	气相色谱	MIP-AES	依次为 0.09，0.12 和 0.4μg·L^{-1}	10
Pb，Sn，Fe，Se，Si，Cr 化合物	煤	气相色谱	ICP-AES	依次为 6，25，15，100，40，60pg	11
Cl_2，Br_2	—	气相色谱	AES	$Cl_2$20ng·S^{-1}，$Br_2$130ng·S^{-1}	12
1,2,3 氯丙烷，丙烯	四氯乙烯粗产品	气相色谱	MIP-AES	—	13
C，H，O，N，S，Cl，Br，F，P，D，Hg，Si	—	联合气相色谱	AES	依次为 0.5，2.2，75，7，1.7，39，75，40，1.5，2.5，0.1，7pg·S^{-1}	14
S	煤	超临界流体萃取气相色谱	AES	—	15
甲醇，辛醇，异丙醇	—	气相色谱	MIP-AES	依次为 1.6，1.7 和 0.8ng·S^{-1}	16
C，N，P，As，O，S，Se	沉淀物，煤，石油	裂解气相色谱	AES	(0.2～300) pg	17

续表

测定对象	样 品	分离方法	检测方法	检出限	文献
As（Ⅲ），As（Ⅴ）	—	离子交换高效液相色谱	DCP-AES	—	18
Cr，Mo，Mn，Ti	钢	离子交换高效液相色谱	顺序 ICP-AES	—	19
Sn	—	离子交换高效液相色谱	ICP-AES	（200～1700）ng	20
As	—	液相色谱	ICP-AES	—	21
Sn（Ⅱ），Sn（Ⅳ），三丁基锡	环境试样	高效液相色谱	ICP-AES	—	22
Cu，Zn，Co，Fe	—	液相色谱	ICP-AES	—	23
Cr（Ⅲ），Cr（Ⅵ）	—	液相色谱	ICP-AES	—	24
正，交和三磷酸盐	—	液相色谱	ICP-AES	依次为 0.5，1 和 3μg	25
氯化甲基汞，氯化乙基汞，二甲基汞	水	高效液相色谱	ICP-AES	（32～62）$\mu g \cdot L^{-1}$	26
Sn	罐头食品，海水，金枪鱼	高效液相色谱	氢化物发生-DCP-AES	$10\mu g \cdot L^{-1}$	27
四苯基铅，六苯基铅	—	液相色谱	ICP-AES	依次为 0.8ng 和 0.3ng	28
Eu，Yb，Ce，Nd 等	地质材料	液相色谱	ICP-AES	—	29
一甲胂酸，二甲次胂酸，砷甜菜碱，砷胆碱，As_2O_3，As_2O_5	环境材料	高效液相色谱	UV-氢化物发生-ICP-AES	—	30
磷酸盐，硅酸盐，砷酸盐	—	高效液相色谱	AES	依次为 26，31 和 $52ng \cdot ml^{-1}$	31
Al，V，Cr，Mn，Fe，Co，Ni，Cu，Zn，Mo，Cd，Pd	湖水，海水	超滤液相色谱	ICP-AES	[0.3(Mn)～33(Pb)] $ng \cdot ml^{-1}$	32
SO_3^{2-}	—	液相色谱	ICP-AES	$80\mu g \cdot L^{-1}$	33
Y，Nb，V 等	锆铀合金	液相色谱	ICP-AES	—	34
Cd，Cu，Zn，S	海洋贻贝	高效液相色谱	ICP-AES	—	35
U-235	废液	液相色谱	电弧 AES	—	36
Co，Cr，Cu，Fe，Mn，Ni，Pb，V	La_2O_3	液相色谱	ICP-AES	（0.2～0.8）$\mu g \cdot g^{-1}$	37
Cr（Ⅲ），Cr（Ⅳ）	—	液相色谱	DCP-AES	—	38
Eu，Yb，Ho	镧系元素，氯化物	液相色谱	AES	依次为 2，5，$50\mu g \cdot g^{-1}$	39
甲基汞，无机汞，As（Ⅲ），As（Ⅴ），DMAs，MMAs	河水，人尿	高效液相色谱	CV-MIP-AES	依次为 0.35，0.15，1，5，6，$1.2ng \cdot ml^{-1}$	40

本表参考文献：

1 Joanna S, Vincent O S, Ryszard L et al. J Anal At Spectrom, 1996; 11(3): 193
2 Khuhawar M Y, Sarafraz-Yazdi A et al. J Chromatogr, 1993; 636(2): 271
3 Pivonka D E, Fateley W G, Fry R C. Appl Spectrosc, 1986; 40(3): 291
4 Lobinski R, Adams F C. J Anal At Spectrom, 1992; 7(6): 987
5 田尾博明，今川隆，宫崎章等. 分析化学（日），1987; 36(7): 447
6 Panaro K W, Erickson D, Krull I S. Analyst, 1987; 112(8): 1097
7 Abdillahi M M. J Chromatogr Sci, 1990; 28(12): 613
8 Tao H, Miyazaki A, Bansho K. Anal Sci, 1988; 4(3): 299
9 Chiba K, Yoshida K, Tanade K et al. Anal Chem, 1982; 54(4): 761
10 Chiba K, Yoshida K, Tanade K et al. Anal Chem, 1983; 55(3): 450
11 Duebelbeis D O, Kapila S. Yates D E et al. J Chromatogr, 1986; 351(3): 465
12 Sullivan J J, Quimby B D. Anal Chem, 1990; 62(10): 1034
13 曾克慰，贾莉，俞惟乐. 色谱，1987; 5(1): 35
14 Quimby B D, Sullivan J J. Anal Chem, 1990; 62(10): 1027
15 Louie P K K, Timpe R C et al. Fuel, 1993; 72(2): 225
16 Goode S R, Kimbrough L K. J Anal At Spectrom, 1988; 3(6): 915
17 Seeley J A, Zeng Y et al. J Anal At Spectrom, 1992; 7(6): 979
18 Urasa I T, Ferede F. Anal Chem, 1987; 59(11): 1563
19 Giglio J J, Mike J H et al. Anal Chim Acta, 1991; 254(1/2): 109
20 Suyani H, Creed J, Davidson T et al. J Chromatogr Sci, 1989; 27(3): 139

21 Rauret G, Rubio R, Radro A. Fresenius' J Anal Chem, 1991; 340(3): 157
22 Mazzucotelli A, Frache R et al. Ann Chim, 1992; 82(7): 379
23 Jinno K, Tsuchida H. Anal Lett, 1982; 15(A5): 427
24 Krull I S, Bushee D, Savage R N et al. Anal Lett, 1982; 15(A3): 267
25 Morita M, Uehiro T. Anal Chem, 1981; 53(13): 1997
26 Krull I S, Bushee D, Schleicher R G et al. Analyst, 1986; 111(3): 345
27 Krull I S, Panaro K W. Appl Spectrosc, 1985; 39(6): 960
28 Nisamanepong W, Caruso J A, Na K C. J Chromatogr Sci, 1985; 23(10): 465
29 Aulis R, Bolton A, Doherty W et al. Spectrochim Acta Part B, 1985; 40B(1/2): 377
30 Violante N, Petrucci F et al. Spectroscopy, 1992; 7(7): 36
31 Pomeroy R S, Baker M E, Kolezynski J D et al. Appl Spectrosc, 1991; 45(2): 198
32 Kobayashi K, Akagl T, Haraguchi H. Bull Chem Soc Jpn, 1990; 63(2): 554
33 Migneault D R. Anal Chem. 1989; 61(3): 272
34 席代明，侯刘奇，付淑敏. 光谱实验室，1989; 6(5): 236
35 Mazzucotelli A, Vigrengo A, Canesi L et al. Analyst, 1991; 116(6): 605
36 张光炎，杨权臣，黄炎民. 原子能科学技术，1991; 25(4): 92
37 刘虎生，分析试验室，1992; 11(2): 55
38 Ahmad S, Murthy R C, Chandra S V. Analyst, 1990; 115(3): 287
39 Kuban V, Jancarova I et al. Anal Chim Acta, 1991; 254(1/2): 21
40 Jose M C F, Florian L, Rosario P G et al. J Anal At Spectrom, 1995; 10(11): 1019

表 4-12 其他分离富集-AES联用技术的应用与进展

测定元素	样 品	分离富集方法	检测方法	检出限	文献
Ag	化探样品	巯基棉色谱分离	ICP-AES	—	1
Ag	高温合金	巯基棉吸附分离	ICP-AES	—	2
总 Hg	河流，湖泊底泥	巯基棉分离富集	ICP-AES	0.001μg·g^{-1}	3
Al, Cu, V, Cd, Cr 等	海水	二乙三胺螯合纤维素滤纸富集	ICP-AES	—	4
Cu, Fe, Zn, Cr, Ni, Mn, V	生物与环境材料	EDTrA 纤维素填充柱预富集	ICP-AES	—	5
Cu, Fe, Pb, Mn, Cr	高纯铝	纤维素收集剂富集	ICP-AES	[4 (Mn) ～ 150 (Fe)] ng·g^{-1}	6
Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, La, Nb, Pb, Sn	—	纤维素，氢氧化锌预富集	ICP-AES	—	7
U	工厂废水	PAN-3 螯合物纤维吸附分离	ICP-AES	5μg·L^{-1}	8
V	海水	螯合官能团固定硅胶分离富集	ICP-AES	60pg·ml^{-1}	9
Cd, Cu, Mn, Pb	海水，尿	聚二硫代氨基甲酸酯	ICP-AES	依次为 0.2, 0.05, 1, 0.15ng	10
Pt	植物	改性硅胶预富集	AES	—	11
Mo, V, Zr, Cr	海水	吸附预富集	ICP-AES	—	12
碘化物, Sn, As, Se, HCO_3^-	地下水	硅橡胶模气液分离	ICP-AES	—	13
Al, Fe, Sb, Pb, Cd, Mg, V, Cr, Bi, Ni, Co, Mn, Sn	高纯氯化铁	载体分馏	AES	0.0001%～0.001%	14
Cd, Pb, Cu, Zn	天然水	chelex-100 富集	ICP-AES	依次为 20, 330, 30, 30ng·L^{-1}	15
Al, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn	雨水	Ionex 预富集	ICP-AES	—	16
Pt, Pd, Rh, Ru, Ir 等	处理 Cu-Ni 矿石的淤泥	聚硫醚吸附预富集	ICP-AES	—	17
Cu, Ag, Pd	海水	Spheronthiol 吸附分离	AES	约为 10ng·g^{-1}	18
As	天然水	酸溶膜滤器预富集	ICP-AES	0.3μg·L^{-1}	19
Fe, Cu, Ti, Ca, Mn, Mg, V, Ni, Zn, Cr, Be, B, Sb, Bi, Sn, Pb	高纯铝	蒸馏分离	ICP-AES	0.05μg·g^{-1}	20
Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Ti, V, Y	水	旋转薄膜蒸发器蒸馏富集	ICP-AES	—	21
Pb, Cd, In, Cu, Co, Ni, Ti, Bi, Zn	海水, 矿泉水, 饮用水	活性炭预富集	ICP-AES	(0.05～0.5) μg·L^{-1}	22

续表

测定元素	样品	分离富集方法	检测方法	检出限	文献
Fe, Co, Ni, Cr, V, Pb	高纯氧化钐	活性炭吸附	直流电弧 AES	(0.15～0.62) μg·g^{-1}	23
Cu, Ni, Pb, Mn, Cd	高纯铝	活性炭富集	直流电弧 AES	—	24
Cu, Cd, Pb	金属锌	活性炭富集	直流电弧 AES	—	25
Cd	生物材料	活性炭在线吸流	ICP-AES	0.25ng·ml^{-1}	26
Cu, Fe, Mg	精细化学品	活性炭预富集	FIA-ICP-AES	—	27
Pb, Cr, Ni, V, Cu, Fe	高纯稀土	活性炭吸附	ICP-AES	依次为0.27, 0.018, 0.11, 0.067, 0.018, 0.02μg·g^{-1}	28
W, Mo	地质材料	活性炭预富集	ICP-AES	W4ng·ml^{-1}, Mo15ng·ml^{-1}	29
Ta	岩石,土壤,沉积物	泡沫塑料富集	AES	0.1μg·g^{-1}	30
Au	地质样品	聚氨酯泡沫塑料动态吸附	AES	0.1ng	31
Cu, Zn, Cd, Mn, Fe, Co, Pb	天然水	PAN-聚氨酯泡沫塑料富集	ICP-AES	—	32
Au, Pt, Pd, Rh, Ir, Os, Ru	地质样品	螯合树脂富集	ICP-AES	—	33
Sb(Ⅲ), Sb(Ⅴ)	冶炼厂废水,铜合金	PAN-3 螯合纤维富集	ICP-AES	—	34
Cd, Co, Cu, Pb	海水,尿	亚氨基二乙酸乙基纤维树脂富集	ICP-AES	依次为0.02, 0.06, 0.09, 0.5μg·L^{-1}	35
Cu	自来水,雨水	PDTQ 树脂富集	FIA ICP-AES	—	36
V	海水	螯合树脂富集	ICP-AES	0.2μg·kg^{-1}	37
Ag, Au, Pd, Pt	地质样品	聚二硫代氨基甲酸树脂预富集	ICP-AES	依次为0.14, 0.62, 0.88, 1.62μg·g^{-1}	38
Cu, Cd, Pb, Hg, Zn, Mn	废水	聚丙烯酰胺树脂富集	ICP-AES	[0.02(Mn)～1.15(Hg)]ng·ml^{-1}	39
Cr(Ⅵ), Cr(Ⅲ)	—	聚二硫代氨基甲酸酯螯合树脂富集	ICP-AES	—	40
Cu, Fe, Mo, Ti, V, Ni, Co, U, Th, Ce, La, Mn, Zn	煤,燃料油	聚二硫代氨基甲酸酯螯合树脂富集	ICP-AES	[2(Mn)～150(Pb)] ng·ml^{-1}	41
U, Nb, Ta, Zr, Hf	海水	聚二硫代氨基甲酸盐树脂富集	ICP-AES	依次为0.17, 0.07, 0.09, 0.02, 0.07ng·ml^{-1}	42
Cu, Zn	天然水,饮用水	在线流动注射预富集	ICP-AES	—	43
SO_4^{2-}	天然水	流动注射预富集	ICP-AES	2.8μg·L^{-1}	44
Mn, Fe, Cr, Mg, Al, Ca, Cu, Na, Zn	生物材料,禽蛋	流动注射预富集	ICP-AES	(0.032～6.5)μg·ml^{-1}	45
Cu	硫酸,硫酸钠,硫酸钾,硫酸镁	流动注射预富集	ICP-AES	—	46
Zn, Mn, As	铜合金,钢铁	流动注射梯度技术	ICP-AES	—	47
B	水	流动注射预富集	ICP-AES	—	48
B	土壤	连续流动技术	ICP-AES	—	49
Cd, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, V	水样	流动注射预富集	ICP-AES	依次为4.0, 7.8, 0.3, 0.6, 6.0, 3.1, 0.5μg·L^{-1}	50
Cd, Cr, Cu, Mg, Zn	—	流动注射预富集	ICP-AES	依次为0.26, 0.5, 0.26, 0.09, 0.51μg·ml^{-1}	51
Mo	—	活性氧化铝柱吸附富集	ICP-AES	0.2ng·ml^{-1}	52
As	海水	氢化物富集	ICP-AES	0.2μg·L^{-1}	53
As, Sb, Bi	矿石	流动注射-氢化物富集	ICP-AES	测定下限达μg·g^{-1}	54

续表

测定元素	样 品	分离富集方法	检测方法	检出限	文献
Pb	海水	螯合树脂预富集和氢化物发生联用	ICP-AES	—	55
As	标准物质	氢化物富集	ICP-AES	0.6μg·L^{-1}	56
Ge	—	氢化物富集	FI-ICP-AES	0.4ng·ml^{-1}	57
As,Bi,Sb,Se,Te	铜	氢化物富集	ICP-AES	依次为 0.2,0.7,2,0.5,2μg·g^{-1}	58
Se	水	氢化物富集	ICP-AES	0.5μg·L^{-1}	59
As	—	流动注射-氢化物富集	ICP-AES	0.0052μg·ml^{-1}	60
As	铜合金	流动注射-氢化物富集	ICP-AES	0.9μg·g^{-1}	61
Sb	铁,铜	氢化物富集	DCP-AES	7.5ng·ml^{-1}	62
As	海水	氢化物富集	MIP-AES	12pg·ml^{-1}	63
As,Sb,Se,Te	硅酸岩石,硫化物矿石	氢化物富集	ICP-AES	依次为 1.1,0.8,0.7,2.2ng·ml^{-1}	64
As,Se	河水	氢化物富集	ICP-AES	As0.3ng·ml^{-1},Se0.6ng·ml^{-1}	65
Sb	地质试样	氢化物富集	DCP-AES	0.2μg·L^{-1}	66
Cd,Cu,Mn,Zn	—	流动注射在线预富集	MIP-AES	依次为 3.6,2.2,3.1,1.8ng·ml^{-1}	67
Cd,Cu,Pb,Zn	雨水,自来水	流动注射在线预富集	ICP-AES	依次为 0.1,0.05,0.6,0.08ng·ml^{-1}	68
Au	金矿勘探区水样	二正辛基亚砜泡沫塑料富集	AES	0.6ng·L^{-1}	69
Ni	全血,血清,尿,人发,海水	Chromosorb 预富集	MIP-AES	5pg	70
Cd,Cu,Fe,Mn,Ni,Zn	河水,海水	8-羟基喹啉和 Amberlite XAD-2 树脂预富集	ICP-AES	依次为 12,18,24,4,60,30ng·L^{-1}	71
Ge	水	丹宁纤维素富集	ICP-AES	15ng·L^{-1}	72

本表参考文献:

1 马自诚，郑厚德．痕量分析，1985；(3/4)：77
2 朱吕田，柳鸿明，李振利等．冶金分析，1991；11(4)：26
3 贾 利．岩矿测试，1995；14(1)：69
4 钱君龙，戚 苓．海洋环境科学，1990；9(1)：85
5 Schramel P，Xu L Q et al．Mikrochim Acta，1992；106(3/6)：191
6 Zaray G，Burba P，Brockaert J A C et al．Spectrochim Acta Part B，1988；43B(3)：255
7 Kenawy I M M．Anal Sci，1992；8(1)：45
8 Chang X，Luo X，Zhan G et al．Mikrochim Acta，1990；1(1/2)：101
9 Hirayana K，Kageyama S，Unohara N．Analyst，1992；117(1)：13
10 Van Berkel W W，Maessen F J M J．Spectrochim Acta Part B，1988；43B(9/11)：1337
11 Otruba V，Strnadova M et al．Talanta，1993；40(2)：221
12 Щерьинина Н Н，Ишмиярова Г Р，Мясоедова Г В……．Ж анал хим，1991；46(8)：1585
13 Cave M R，Green K A．J Anal At Spectrom，1989；4(2)：223
14 李全福．理化检验（化学分册），1991；27(5)：277
15 Vermeiren K，Vandecasteele C，Dams R．Analyst，1990；115(1)：17
16 Benda F，Filistein V et al．Int J Environ Anal Chem，1993；50(1)：9
17 Балуда В П，Мискарьянц В Т，Никитина Л А……．Ж анал хим，1982；37(9)：1569
18 Брыкина Г Д，Козырева Г В，Хлыстова А Д……．Ж анал хим，1985；40(11)：1978
19 Hata N，Kasahara I，Taguchi S et al．Analyst，1989；114(10)：1255
20 泉 巌．分析化学（日），1989；38(7)：341
21 柳少锋，董文霞，赵连英．岩矿测试，1994；13(3)：207
22 Bendt H，Harms U，Sonneborn M．Fresenius' Z Anal Chem，1985；322(3)：329
23 高尚芬，廖振环，韩凤梅．痕量分析，1990；论丛(1/2)：74
24 Elei L，Dogan M．Fresenius' Z Anal Chem，1988；330(7)：610
25 Elei L．Anal Let，1993；26(12)：2667
26 Okamato Y，Murata A，Kumamaru T．Anal Sci，1991；7(6)：879
27 Ambrose A J，Ebdon L，Jones P．Anal Proc，1989；26(11)：377
28 廖振环，江祖成，李 琳等．武汉大学学报，1988；(1)：87
29 Hall G E M，Pelchat J C，De Silva K N．Analyst，1987；112(5)：631
30 熊昭春，彭振英．分析化学，1987；15(6)：532
31 王玉琨．理化检验（化学分册），1990；26(5)：280
32 郭伟英，曾尧泽．理化检验（化学分册），1994；30(5)：289
33 段玉然，李继华，徐羽梧．分析化学，1994；22(4)：366

34 常希俊，罗兴寅，孙国祥等．兰州大学学报（自然科学版）．1990；26(1)：35

35 Caroli S, Alimonti A, Petrucci F et al. Anal Chim Acta, 1991; 248(1): 241

36 王小如，Barnes R M．痕量分析，1991；7(3/4)：59

37 Dupont V, Auger Y, Jeandel C et al. Anal Chem, 1991; 63(5): 520

38 Chung Y S, Barnes R M. J Anal At Spectrom, 1988; 3(8): 1079

39 Mahanti H S. Res Ind, 1990; 35(2): 124

40 Miyazaki A, Barnes R M. Anal Chem, 1981; 53(2): 364

41 Mahanti J S, Barnes R M. Anal Chim Acta, 1983; 148: 395

42 江祖成，曾纪铭等．分析试验室，1995；14(2)：1

43 Wang X, Barnes R M. J Anal At Spectrom, 1989; 4(6): 509

44 Cox A G, Mcleod C W, Miles D L et al. J Anal At Spectrom, 1987; 2(6): 553

45 陈 浩，孔令英，江祖成等．环境化学，1989；8(1)：68

46 Davey D E, Metz G J H. J Anal At Spectrom, 1988; 3(2): 375

47 罗建波，张展霞，钱浩雯等．高等学校化学学报，1989；10(12)：1185

48 Kempster P L, Van Vliet H R, Van Staden J F. Anal Chim Acta, 1989; 218(1): 69

49 Novozamsky I, Van Eck R, Van der Lee J J et al. At Spectrosc, 1988; 9(4): 97

50 程向红，周俊明，刘汉东等．分析试验室，1996；15(5)：66

51 Brushwyler K R, Carter L D, Hieftje G M. Appl Spectrosc, 1990; 44(9): 1438

52 Furuta N, Brushwyler K R, Hieftje G M. Spectrochim Acta Part B, 1989; 44B(4): 349

53 刘虎生，冯斌，潘彦林．理化检验（化学分册），1986；22(5)：280

54 高汉山，李克林．分析化学，1991；19(11)：1285

55 Reimer R A, Miyazaki A. J Anal At Spectrom, 1992; 7(8): 1239

56 Aizpun F A, Valdes-Heviay T C et al. Talanta, 1992; 39(11): 1517

57 Nakata F, Sunahara H, Fujimoto H et al. J Anal At Spectrom, 1988; 3(4): 579

58 Kujirai O, Kohri M, Yamada K et al. Anal Sci, 1990; 6(3): 379

59 山垣浩司，高桥正，山田启夫等．分析化学（日），1990；39(6)：359

60 陈 浩，江祖成，孔令英等．分析测试通报，1990；9(1)：9

61 王化南，陈 瑶．分析化学，1994；22(8)：816

62 Chen H W, Brindle I D et al. Analyst, 1992; 117(10): 1603

63 Matusiewicz H. Spectrochim Acta Part B, 1990; 45B(1/2): 209

64 Halicz L, Russell G M. Analyst, 1986; 111(1): 15

65 Hisatake N, Jun-Yan C. At Spectrosc, 1996; 17(2): 77

66 Peramaki P, Lajunen L H J. Analyst, 1988; 113(10): 1567

67 Dongmei Y, Hanqi Z, Qinhan J. Talanta, 1996; 43(4): 535

68 Yang C, Zhuang Z, Wang X et al. At Spectrosc, 1994; 15(3): 135

69 吴铁民，吴任泉，文恭良等．理化检验（化学分册），1994；30(1)：19

70 Drews W, Weber G, Toelg G. Anal Chim Acta, 1990; 231(2): 265

71 Porta V, Sarzanini C et al. Anal Chim Acta, 1992; 258(2): 237

72 熊采华，江宝林，王名生．分析测试通报，1992；11(1)：64

第二节 发射光谱分析法的应用

表 4-13 AES 法在钢铁、合金及有色金属分析中的应用

样 品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
低合金钢、普碳钢、生铁、铸铁	ICP-AES	Al	308.215	0.047	0.01～1.00	3.120～3.611	－3.4～7.0	1
		Co	228.616	0.031	0.01～1.00	6.500	－7.1～6.5	
		Cr	286.257	0.031	0.01～1.00	1.115～2.778	－10.5～11.5	
		Cu	327.396	0.0084	0.01～1.00	1.272～1.471	－6.6～2.2	
		Mn	293.306	0.014	0.01～2.00	0.877～2.889	－25～1.2	
		Mo	281.615	0.011	0.01～1.00	1.182～2.750	－7.9～7.7	
		Ni	341.477	0.034	0.01～1.00	1.543～9.000	－10.5～0.3	
		Si	251.612	0.038	0.01～1.00	2.038～4.216	－5.7～2.0	
		Ti	368.519	0.0023	0.01～1.00	0.871～2.614	－2.4～1.1	
		V	310.230	0.0068	0.01～1.00	1.084～2.593	－2.7～2	
高、中合金钢、不锈钢工具钢、高铬铸铁	ICP-AES	Al	308.215	0.057	0.03～2.0	0.789～3.111	0.4～4.8	1
		Co	228.616	0.055	0.03～2.0	0.552～5.789	0.7～1.3	
		Cu	327.396	0.020	0.01～2.0	0.738～3.333	－2.0～3.4	
		Mn	293.306	0.014	0.01～2.0	0.717～1.021	－2.3～1.9	
		Mo	281.615	0.036	0.02～2.0	0.498～1.561	－3.1～2.3	
		Ni	341.477	0.047	0.02～2.0	0.589～0.669	－5.0～1.3	
		Ti	368.519	0.0020	0.01～2.0	0.736～1.525	1.0～9.1	
		V	310.230	0.0024	0.01～2.0	0.650～1.014	－14～0.3	
高、中、低合金钢	ICP-AES	Ti	336.121	0.0035	0.001～2.00	1.180～2.683	－2.7～1.4	1
		Nb	316.340	0.0214	0.005～0.650	1.069～5.088	－3.6～3.6	
		W	207.911	0.0315	0.10～5.00	0.610～1.374	－1.5～1.6	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
低合金钢、普碳钢	ICP-AES	P	178.224	0.36	0.005～0.100	1.92	−0.3	1
低合金钢、碳素钢、生铁、铸铁	ICP-AES	Ba	455.404	0.00080	0.0005～0.01	5.000	−1.0	1
		Mg	279.553	0.0035	0.001～0.025	6.170	3.6	
		Sc	361.384	0.0015	0.0005～0.01	5.000	0.67	
		Sr	407.711	0.00060	0.0005～0.01	5.208	0.33	
		B	249.773	0.016	0.001～0.05	6.300	−0.5	
		Be	234.861	0.00070	0.0005～0.01	5.000	1.5	
		Ce	413.380	0.040	0.005～0.15	3.300	2.33	
		La	333.749	0.018	0.005～0.1	4.400	−2.52	
		Zn	213.856	0.014	0.001～0.05	8.500	0.75	
		Zr	343.823	0.012	0.005～0.05	3.402	−4.85	
球墨铸铁、碳钢、低合金钢	ICP-AES	Mg	279.079	0.0678	0.005～0.20	2.440	−5.6～7.7	1
硅铁	ICP-AES	Al	396.152	—	0.1～3.0	2.198	−1.3	1
		Ca	393.366	—	0.01～1.5	3.619	0.3	
		Cr	267.716	—	0.01～0.5	2.535	1.4	
		Mn	293.306	—	0.01～0.5	4.926	−2.9	
高钒铁	ICP-AES	Cu	327.396	0.013	0.01～0.50	1.122	2.5	1
		Mn	293.306	0.038	0.01～0.50	1.340	4.6	
		Ni	341.477	0.057	0.01～0.10	2.000	0.0	
		Si	251.612	0.269	0.10～2.00	1.095	0.6	
		Ti	368.519	0.0053	0.005～0.10	1.250	1.0	
钼铁	ICP-AES	Si	251.612	0.265	0.05～0.67	1.119～3.644	−2.2～0	1
		Cu	327.396	0.0068	0.01～0.191	0.521～1.143	−1.1～0.5	
钢铁	MPI-AES	Cu	324.8	0.0033	—	7.2	—	2
		Zn	213.9	0.0014	—	4.9	—	
		Cd	228.8	0.0017	—	5.8	—	
碳素钢、标准纯铅、电镀废水	MIP-AES	Cu	324.7	0.0021	(0.05～40) $\mu g \cdot ml^{-1}$	4.1	—	3
合金钢	火花激发和辉光放电-ICP-AES	C	165.70	110	0.018～2.11	4.6	—	4
		Mn	257.61	80	0.180～18.50	0.8	—	
		Cr	267.72	390	0.158～23.50	0.8	—	
		Ni	225.39	140	0.150～13.10	2.9	—	
钢、合金、植物	氢化物发生-ICP-AES	As	228.81	0.0007	(0.01～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	2.0	—	5
钢	ICP-AES	B	249.773	20ng	(5～1000) $\mu g \cdot ml^{-1}$	1.90	−1.12	6
钢	ICP-AES	B	249.77	—	(0.1～490) $\mu g \cdot ml^{-1}$	4	—	7
钢	ICP-AES	B	208.959	0.65	—	0.5～1.5	—	8
钢	AES	Ca	422.7	≤0.009	2个数量级	7.5～12.2	—	9
钢	ICP-AES	P	281.615	0.4	(0.4～200) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	10
钢	ICP-AES	S	182.04	0.020	≤500$\mu g \cdot ml^{-1}$	3	—	11
钢铁、高温合金	ICP-AES	Se	196.0	5	—	5.9～9.7	—	12
钢、合金	MIP-AES	W	400.875	1.5	0.2～80	—	—	13
低合金钢	氢化物发生-ICP-AES	As	193.76	0.3	≤1$\mu g \cdot ml^{-1}$	2～3	—	14
		Sb	206.83	0.3	≤1$\mu g \cdot ml^{-1}$	2～3	—	
		Bi	223.06	1	≤1$\mu g \cdot ml^{-1}$	2～3	—	
钢铁	ICP-AES	As	193.696	1.1ng	≤10$\mu g \cdot ml^{-1}$	4.5	—	15
		Sb	217.581	0.2ng	≤5$\mu g \cdot ml^{-1}$	3.2	—	
高碳铬铁	ICP-AES	Si	251.61	—	(8.5～116) $\mu g \cdot g^{-1}$	0.64～1.00	—	16
钒铁	火花烧蚀-ICP-AES	Si	251.611	15	—	<0.3	—	17
		Al	396.152	5	—	<0.3	—	
		Cu	327.396	2	—	<0.3	—	
		Mn	257.610	8	—	<0.3	—	
		V	309.310	—	—	<0.3	—	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
锰铁、铬铁	ICP-AES	Al	394.401	0.12	—	—	—	18
		Co	350.228	0.012	—	1.9～3.6	—	
		Cr	360.533	0.12	—	3.1	—	
		Cu	324.754	0.012	—	1.5～8.7	—	
		Mn	257.610	0.060	—	2.5	—	
		Mo	317.035	0.060	—	33.3	—	
		Ni	231.604	0.060	—	4.7～15.7	—	
		Si	251.611	0.060	—	1.1～2.5	—	
		Ti	363.546	0.060	—		—	
		V	311.071	0.012	—	2.6～4.3	—	
纯铁	AES	Sn	317.50	2μg	0.001～0.01	5.6	—	19
		Pb	283.30	1μg	0.0002～0.001	7.1	—	
		Sb	233.1	3μg	0.0005～0.001	6.8	—	
		As	234.9	10μg	0.002～0.010	8.9	—	
		Bi	306.7	1μg	0.0003～0.001	9.2	—	
纯铜	直流电弧-AES	As	234.9	0.1	(1～170) $\mu g \cdot g^{-1}$	8.6	−8.4	1
		Sb	206.8	0.1	(1～90) $\mu g \cdot g^{-1}$	7.4	1.1	
		Bi	306.7	0.1	(0.16～120) $\mu g \cdot g^{-1}$	4.7	−16	
		Pb	405.7	0.1	(0.8～150) $\mu g \cdot g^{-1}$	3.5	−2.2	
		Sn	283.9	0.1	(0.8～144) $\mu g \cdot g^{-1}$	6.8	−9	
		Fe	248.3	0.5	(1～188) $\mu g \cdot g^{-1}$	10.6	−1.6	
		Ni	305.0	0.5	(1～208) $\mu g \cdot g^{-1}$	6.1	−27.6	
		Zn	334.5	0.1	(1～150) $\mu g \cdot g^{-1}$	3.2	−15.9	
		P	255.4	0.8	(0.8～480) $\mu g \cdot g^{-1}$	10.6		
		Co	345.3	0.1	(0.4～39.6) $\mu g \cdot g^{-1}$	7.5	−36.7	
		Te	238.5	0.1	(0.8～36) $\mu g \cdot g^{-1}$	9.5	21.3	
		Cd	228.8	<0.1	(0.3～39) $\mu g \cdot g^{-1}$	9.3	−5	
		Mn	403.0	<0.1	(0.1～10) $\mu g \cdot g^{-1}$	10.2	14.8	
		Ag	328.0	0.1	(1～120) $\mu g \cdot g^{-1}$	6.5	−9	
		Si	288.1	0.1	(0.24～100) $\mu g \cdot g^{-1}$	12.5	—	
		Al	396.1	0.08	(0.08～50) $\mu g \cdot g^{-1}$	14.4	—	
黄铜 H62	火花-AES	Pb	405.78	—	0.02～0.25	2.0	—	1
		Fe	259.93	—	0.02～0.20	2.0	—	
		Bi	306.77	—	0.001～0.008	3.0	—	
		Sb	231.14	—	0.003～0.025	3.3	—	
		P	178.28	—	0.005～0.06	2.0	—	
黄铜 H68	火花-AES	Pb	405.78	—	0.01～0.10	6.6	—	1
		Fe	259.93	—	0.02～0.20	1.9	—	
		Bi	306.77	—	0.001～0.008	6.0	—	
		Sb	231.14	—	0.002～0.02	8.0	—	
		P	178.28	—	0.005～0.04	4.0	—	
		As	189.04	—	0.015～0.12	2.0	—	
铅黄铜 HPb 59-1	AES	Fe	259.93	—	0.01～0.60	1.5	—	1
		Bi	306.77	—	0.001～0.006	3.5	—	
		Sb	231.14	—	0.005～0.025	2.3	—	
		P	178.28	—	0.014～0.05	1.5	—	
		Al	394.40	—	0.1～0.6	1.0	—	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
锡磷青铜 QSn 7-0.2	AES	Pb	405.78	—	0.003～0.05	5.7	—	1
		Fe	259.93	—	0.005～0.15	2.0	—	
		Bi	306.77	—	0.001～0.005	9.0	—	
		Sb	231.14	—	0.001～0.02	—	—	
		Ni	341.47	—	0.015～0.28	5.1	—	
		Si	288.15	—	0.002～0.06	2.0	—	
		Al	394.40	—	0.001～0.02	3.9	—	
纯铜	ICP-AES	Sn	189.98	5	0～0.20	—	—	[illegible]
		Pb	220.35	8	0～0.20	—	—	
		Zn	206.20	4	0～0.10	—	—	
		Fe	238.20	3	0～0.20	—	—	
		Ni	231.60	3	0～0.40	—	—	
		As	193.75	1	0～0.20	—	—	
		Sb	206.93	10	0～0.20	—	—	
铝青铜	火花-AES	Al	256.8	—	2.5～12.5	0.63～0.74	0.5	1
		Fe	271.4	—	0.4～6.4	0.91～0.93	−1.0	
		Mn	263.8	—	0.2～3.5	1.03～1.31	0.4	
		Ni	349.3	—	0.2～5.2	0.62～0.83	0.4	
		Zn	334.5	—	0.2～1.9	0.87	0.1	
		Sn	189.9	—	0.04～0.3	0.76	−1.0	
		Pb	283.3	—	0.01～0.06	4.75	−1.8	
		Si	288.1	—	0.03～0.3	1.01	1.9	
		P	—	—	0.006～0.06	2.34	4.6	
硅青铜	火花-AES	Si	212.4	—	0.25～4.2	1.52～1.97	−1.6	1
		Mn	263.8	—	0.09～2.5	0.093～1.30	−0.8	
		Sn	317.5	—	0.08～1.9	2.36～4.74	3.8	
		Ni	349.3	—	0.1～3.9	1.12～3.0	−1.2	
		Cr	298.9	—	0.02～0.4	4.64	−8.1	
		Pb	283.3	—	0.01～0.2	4.45	0.8	
		Fe	271.4	—	0.06～0.5	2.56	−0.7	
		Al	394.4	—	0.003～0.1	2.39	−4.0	
		Zn	334.5	—	0.2～1.0	1.15	−0.7	
锡磷青铜	火花-AES	Sn	317.5	—	3.2～8.9	0.80	−0.5	1
		P	178.3	—	0.03～0.7	0.83	−3.8	
		Pb	405.9	—	0.01～0.12	1.89	11.1	
		Fe	259.9	—	0.01～0.09	1.86	−1.9	
		Bi	306.7	—	0.0006～0.008	4.0	−6.8	
		Sb	231.1	—	0.002～0.014	12.44	−11.4	
		Si	288.1	—	0.001～0.01	7.95	2.3	
		Ni	341.4	—	0.04～0.3	0.75	−2.3	
		Zn	334.5	—	0.05～0.9	1.17	−3.7	
铅黄铜	火花-AES	Pb	283.3	—	0.5～3.5	1.30～3.07	−0.6	1
		Fe	259.9	—	0.07～0.75	1.81～2.27	−0.8	
		Bi	306.7	—	0.001～0.008	10.0	0.8	
		Sb	231.1	—	0.002～0.04	6.15	0.7	
		Sn	189.9	—	0.06～0.5	—	2.8	
		Al	394.4	—	0.06～0.6	2.39	3.5	
		Si	288.1	—	0.005～0.2	7.03	19.2	
		P	178.3	—	0.01～0.06	3.05	—	
复杂黄铜	火花-AES	Fe	271.4	—	0.2～1.54	0.73	−2.8	1
		Mn	243.8	—	0.04～3.5	2.6～3.2	0.7	
		Al	394.4	—	0.007～1.5	0.79～1.5	−0.6	
		Sn	317.5	—	0.03～1.5	2.2	−2	
		Pb	405.9	—	0.03～1.3	3.4	−1.9	
		Bi	306.7	—	0.001～0.01	1.0	−4.5	
		Sb	231.1	—	0.003～0.04	5.76	−1.5	
锡黄铜	火花-AES	Sn	317.5	—	0.4～1.6	0.86	1.0	1
		As	189.0	—	0.01～0.08	1.70	−2.4	
		Pb	405.8	—	0.01～0.1	2.46	3.0	
		Fe	259.9	—	0.02～0.4	1.21	0.5	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g\cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
锡黄铜	火花-AES	Bi	306.7	—	0.001～0.008	11.12	−2.9	
		Sb	231.1	—	0.003～0.02	5.25	0	
		P	178.3	—	0.007～0.06	2.10	−1.9	
铝黄铜	火花-AES	Al	256.8	—	0.4～2.9	0.37	2.2	1
		As	189.0	—	0.01～0.08	2.9	0	
		Pb	405.8	—	0.01～0.10	1.5	7.1	
		Fe	259.9	—	0.02～0.12	2.5	—	
		Bi	306.7	—	0.001～0.007	15.3	3.6	
		Sb	231.1	—	0.01～0.10	3.4	10.7	
		Sn	189.9	—	0.015～0.12	—	—	
		Ni	349.3	—	0.06～0.5	—	—	
		P	178.3	—	0.015～0.10	2.5	−8.2	
黄铜	火花-AES	Pb	405.8	—	0.02～0.2	1.15	1.0	1
		Fe	259.9	—	0.015～0.3	1.73	−11.9	
		Bi	306.7	—	0.001～0.008	4.44	7.3	
		Sb	231.1	—	0.002～0.02	4.43	8.6	
		P	178.3	—	0.005～0.05	1.24	1.1	
		Zn	481.0	—	20～40	0.42	0.9	
		Cu	510.5	—	—	0.27	−0.2	
铜镍合金	火花-AES	Ni	349.3	—	3.0～40	0.57	−0.4	1
		Fe	271.4	—	0.1～2.4	1.11	−1.5	
		Mn	263.8	—	0.1～2.5	1.46	−0.5	
		Si	288.1	—	0.05～0.5	0.095	−1.2	
		Pb	405.9	—	0.02～0.2	7.71	−3.5	
		P	178.3	—	0.006～0.008	4.69	−1.4	
白铜 B19	火花-AES	Ni	349.3	—	3.0～4.0	0.12	−0.3	1
		Fe	259.9	—	0.6～1.7	1.52	−0.4	
		Mn	263.8	—	0.05～1.5	1.59	−1.9	
		As	189.0	—	0.004～0.03	3.04	−1.6	
		Bi	306.7	—	0.001～0.008	9.58	−12.9	
		Mg	383.8	—	0.025～0.45	2.36	7.8	
		P	178.3	—	0.003～0.06	5.0	10.5	
		Pb	405.8	—	0.002～0.02	11.83	11.5	
		Si	288.1	—	0.03～0.3	0.64	6.1	
铝及铝合金	交流电弧-AES	Si	251.61	0.4	0.001～0.05	6.2	0	1
		Fe	302.06	0.4	0.001～0.05	4.7	2.1	
		Cu	324.75	0.5	0.0005～0.02	7.03	−0.6	
纯铝	火花-AES	Fe	371.99	5.2	0.02～1.2	2.76	2.6	1
		Si	251.61	1.2	0.02～1.3	2.60	−2.7	
		Cu	324.75	0.4	0.003～0.06	2.97	−0.7	
		Mg	282.93	17	0.004～0.025	1.40	−1.3	1
		Mn	403.45	2.3	0.0005～0.04	0.92	−2.2	
		Zn	334.50	3.9	0.001～0.02	4.26	1.9	
		Ti	337.28	0.6	0.001～0.02	10.9	−1.1	
		Cr	425.43	3.2	0.002～0.02	1.48	0.7	
		Ni	341.47	3.0	0.001～0.02	0.2	0	
		Ga	417.21	1.2	0.001～0.04	1.95	−1.2	
		V	437.92	3.2	0.0005～0.01	6.23	0	
低铝合金	火花-AES	Mn	403.45	8.1	0.04～1.5	0.90	−1.2	1
		Mg	382.93	7.8	0.01～1.3	0.67	1.2	
		Si	251.61	3.1	0.07～0.9	0.43	−1.5	
		Cr	425.43	4.2	0.002～0.41	0.55	2.8	
		Fe	371.99	2.6	0.1～0.7	0.87	−1.3	
		Cu	324.75	2.4	0.004～0.5	0.67	0.3	
		Zn	334.50	5.1	0.007～0.15	0.38	−2.4	
		Ni	341.47	—	0.01～0.05	0.88	2.3	
		Sn	317.51	—	0.01～0.05	1.05	−4	
		Pb	368.35	—	0.001～0.04	1.97	−8.7	
		Ti	337.28	—	0.007～0.2	0.77	1.3	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
铝-铜合金	火花-AES	Cu	510.55	15	0.50～11.5	2.28	−3.9	1
		Fe	371.99	4.7	0.10～1.0	2.87	0.1	
		Si	251.61	3.4	0.10～1.0	2.29	−8.9	
		Mg	281.93	8.3	0.005～0.025	1.66	−3.4	
		Mn	403.45	3.6	0.004～0.04	1.74	2.6	
		Zn	334.50	5.6	0.005～0.20	0.62	−3.5	
		Cr	425.43	4.7	0.002～0.02	2.4	32.6	
		Ti	337.28	3.1	0.001～0.02	7.86	−9.8	
		Ni	341.47	3.1	0.001～0.015	0	21.4	
铝-硅系合金	火花-AES	Si	390.55	26	5.0～15.0	1.02	0.2	1
		Mg	517.26	12	0.02～0.7	2.73	−2.3	
		Mn	403.44	5.1	0.08～0.7	2.51	−4.8	
		Fe	371.99	4.3	0.15～1.0	2.9	0	
		Cu	510.55	3.6	0.10～1.1	0.58	2.4	
		Zn	330.25	5.0	0.04～0.6	0.63	0.9	
		Sn	317.50	—	0.004～0.03	1.15	1.3	
		Pb	405.78	5.1	0.02～0.16	2.58	1.4	
铝-镁系合金	火花-AES	Mg	517.26	11	0.40～5.0	0.67	−0.1	1
		Mn	403.44	1.6	0.20～1.5	0.60	0.4	
		Cr	425.43	1.2	0.04～0.45	0.50	2.3	
		Si	251.61	2.0	0.10～1.0	0.86	−0.1	
		Fe	371.99	3.2	0.08～0.75	0.94	0	
		Cu	324.75	4.7	0.007～0.25	1.02	0.3	
		Zn	330.25	0.2	0.02～0.35	1.06	−0.6	
		Ti	337.27	1.3	0.02～0.2	3.30	2.9	
		Ni	341.47	1.2	0.01～0.15	1.05	0.9	
铝-铜-镁系合金	火花-AES	Cu	510.55	17	1.0～6.0	0.73	0.7	1
		Mg	382.93	13	0.8～3.0	0.73	0.7	
		Mn	403.45	5.4	0.1～1.0	1.32	−0.5	
		Fe	371.99	4.4	0.15～0.80	1.54	−8.0	
		Si	288.16	4.8	0.10～0.60	0.49	−8.5	
		Zn	334.50	3.6	0.05～0.75	0.42	0.7	
		Ti	337.28	2.5	0.01～0.20	0.78	−9.3	
		Ni	341.47	2.6	0.02～0.25	—	—	
铝-硅-铜系合金	火花-AES	Si	390.55	88	3.0～15.0	0.54	−0.3	1
		Cu	510.55	82	0.5～9.0	0.94	−2.1	
		Mg	517.26	25.6	0.1～1.3	1.38	−1.9	
		Mn	403.44	7.2	0.1～1.3	1.11	0.9	
		Fe	371.99	3.6	0.1～1.2	0.97	−0.4	
		Zn	330.25	4.5	0.09～1.0	0.61	2.0	
		Sn	317.50	3.6	0.003～0.02	1.52	0.7	
		Pb	405.78	2.0	0.02～0.12	1.30	−1.8	
		Ni	341.47	4.4	0.02～0.60	1.44	−0.8	
镁及镁合金	交流电弧-AES	Fe	302.06	0.1	0.002～0.065	3.91	−2.1	1
		Mn	259.37	0.3	0.01～0.1	2.78	−5.3	
		Si	251.61	0.2	0.004～0.04	3.61	−12.2	
		Cu	324.75	0.5	0.0005～0.0074	8.00	−5.8	
		Al	396.15	0.2	0.003～0.02	2.60	−1.1	
		Ni	341.47	2.5	—	5.50	—	
镁基合金	火花-AES	Al	396.15	3.0	7.0～10.5	2.58	0.8	1
		Zn	213.86	4.14	0.20～0.85	2.65	1.3	
		Mn	403.44	14.7	0.09～0.50	2.84	−0.6	
		Be	313.04	0.4	0.001～0.004	1.82	−3.0	
		Si	251.61	15.3	0.1～0.45	3.87	0.9	
		Fe	371.99	5.5	0.020～0.0445	2.61	0	
		Cu	324.75	1.6	0.05～0.5	4.38	1.2	
		Ni	341.47	0.5	0.009～0.035	2.21	2.7	
锌及锌合金	ICP-AES	Al	396.15	10	0～10.0	—	—	1
		Cu	324.75	2	0～5.0	—	—	
		Mg	297.50	1	0～1.0	—	—	
		Fe	259.90	8	0～1.0	—	—	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
镁-铝合金	ICP-AES	Be	313.042	1.2ng	0.0000005～0.01	1.3	—	20
铝合金	AES	Li	670.78	0.003	5个数量级	—	−0.31～1.88	21
			610.36	0.8	5个数量级	1.3	−2.19～0.42	
铝合金	ICP-AES	Ti	334.9	—	0.0x～0.x	2～7	−8～4	22,
		Zr	349.6	—	0.0x～0.x	1.8～3.3	0～6	23
		Ce	418.6	—	0.0x～0.x	2.3～4.1	−4～6	
		Fe	263.1	—	0.0x～0.x	4～6	−9～0	
		Si	288.1	—	0.0x～0.x	6～7	−10～0	
		Lu	335.9	0.7	—	0.7	5	
		La	379.4	0.4	—	2.7	10	
		Tm	342.5	3.5	—	0.7	0	
		Y	360.0	0.9	—	0.8	0	
		Er	369.2	0.5	—	1.3	—	
		Yb	369.4	0.9	—	1.0	5	
		Ho	389.1	0.8	—	1.1	15	
		Pr	390.9	1.1	—	1.0	15	
		Eu	393.0	0.2	—	1.6	0	
		Dy	353.1	0.4	—	1.9	−5	
		Nd	401.2	3.0	—	2.4	10	
		Sm	388.5	2.1	—	2.4	−10	
		Gd	364.6	0.1	—	0.6	0	
		Tb	367.6	1.3	—	1.0	−24	
混合稀土铜合金	ICP-AES	La_2O_3	405.0	—	0.096～6.4	3.6	−14.0	24
		Pr_6O_{11}	390.84	—	0.0384～2.56	3.2	−2.0	
		Sm_2O_3	388.52	—	0.024～1.6	3.0	5.6	
		Zn	334.5	—	0.396～6.7	5.4	−5.2	
		Fe	275.57	—	0.024～1.6	5.0	4.0	
		Mg	279.09	—	0.024～1.6	4.1	−10.0	
		Al	308.2	—	0.0384～1.28	7.6	16.0	
		CeO_2	357.75	—	0.24～16	5.2	−4.8	
		Nd_2O_3	386.34	—	0.096～6.4	5.1	0	
		Sn	303.41	—	0.096～3.2	9.1	−14.8	
		Pb	283.3	—	0.096～6.4	3.9	−1.1	
		Mn	293.3	—	0.024～1.6	4.5	−2.0	
		Ni	352.4	—	0.048～3.2	5.0	13.7	
稀土铝合金	ICP-AES	La	379.0	—	0.01～16	1.4	10.3	25
		Ce	413.7	—	0.025～0.4	4.2	0	
		Pr	390.8	—	0.02～0.32	4.2	−8.6	
		Nd	410.9	—	0.02～0.32	3.4	−6.9	
		Sm	359.2	—	0.004～0.032	8.1	8.3	
		Gd	342.2	—	0.002～0.032	5.2	2.3	
		Fe	259.9	—	0.035～0.405	4.0	−0.7	
		Mg	277.9	—	0.1～1.6	6.4	9.6	
		Ti	308.8	—	0.003～0.048	5.0	−7.4	
		Zn	334.5	—	0.055～0.335	5.4	−1.4	
		Mn	293.3	—	0.004～0.064	3.9	−26.5	
		Cu	327.4	—	0.005～0.035	7.9	3.2	
镁-钕合金	ICP-AES	La	324.51	—	0.040～1.28	3.5	5.8	26
		Ce	413.38	—	0.050～1.600	2.0	6.1	
		Pr	406.28	—	0.050～1.600	2.1	5.2	
		Nd	354.35	—	0.640～20.480	2.3	−1.4	
		Sm	411.86	—	0.025～0.800	5.2	−7.4	
		Fe	259.96	—	0.025～0.800	7.2	−3.2	
		Ni	352.45	—	0.025～0.800	4.8	13.8	
		Mo	319.40	—	0.025～0.800	3.4	4.5	
		Al	308.22	—	0.020～0.640	7.6	2.2	
		Cu	324.75	—	0.010～0.320	5.4	9.2	
钨合金	AES	Cr	278.1		0.0006～0.01	—		27
		Ar	255.7		0.0006～0.02	10.5		
		Mg	280.2		0.0006～0.01	—		

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
钨合金	AES	Sn	283.9	0.6~10	0.0006~0.01	6.0	−4.7~3.4	
		Mn	293.3		0.0006~0.01	3.3		
		Cu	327.4		0.0006~0.01	7.6		
		Mo	317.0		0.0125~0.4	—		
		Ca	317.9		0.0006~0.02	10.1		
		Pb	283.3		0.0002~0.01	—		
		Si	251.4		0.001~0.05	5.4	−4.7~3.4	
		Sb	259.8		0.0025~0.04	—		
镍基合金	ICP-AES	Zn	213.9	0.004	≤0.05μg	—	—	28
		Pb	220.4	0.01	≤0.10μg	—	—	
		Cd	228.8	0.04	≤0.005μg	—	—	
		Mg	279.1	0.08	≤0.10μg	—	—	
铝合金	AES	Mg	285.21	—	0.041~1.53	4.6	2.7	29
		Cu	324.75	—	0.040~7.08	1.6	6.5	
		Ni	352.45	—	0.012~2.16	3.1	18	
		Fe	371.99	—	0.075~0.97	2.7	11	
		Mn	403.08	—	0.026~0.30	2.4	4.3	
钯-钡合金	ICP-AES	Ba	455.403	—	(0~50.00) $\mu g \cdot ml^{-1}$	1.8	−2.6	30
PtCu 和 PdCu 系列合金	ICP-AES	Bi	306.7	2.9	0.03~0.24	3.7	—	31
		Pd	363.4	4.9	0.03~0.24	1.8	—	
		Pt	265.9	3.6	0.02~0.16		—	
		Rh	343.4	5.0	0.02~0.16	1.9	—	
		Ir	254.3	2.6	0.02~0.16	7.5	—	
		Sn	189.9	4.2	0.02~0.16	1.8	—	
		Sb	217.5	2.2	0.02~0.16	6.4	—	
		Pb	220.3	5.8	0.02~0.16	2.9	—	
		As	193.7	4.8	0.02~0.16	2.2	—	
		Al	396.1	1.5	0.02~0.16	2.1	—	
		Au	267.5	1	0.01~0.08	2.9	—	
		Ni	231.6	1.1	0.01~0.08	0.8	—	
		Fe	259.9	1.3	0.01~0.08	0.8	—	
		Ag	328.0	1.2	0.004~0.032	0.8	—	
		Zn	206.2	2.2	0.004~0.032	0.6	—	
		Mg	279.5	1.5	0.002~0.016	0.8	—	
		Mn	257.6	1.2	0.002~0.016	2	—	
		Cu	324.7	—	2~40	0.5	—	
Ag-Mg-Ni 合金	ICP-AES	Mg	279.55	—	(100~1000)ug	0.06	—	32
		Ni	231.60	—	(100~1000)ug	0.19	—	
PtRh 和 PdRh 系列合金	ICP-AES	Rh	343.489	—	2~32	0.8	2.0	33
		Pd	363.470	—	0.02~0.16	4.6	−5.5	
		Pt	265.945	—	0.01~0.08	4.6	−5.5	
		Ir	224.268	—	0.01~0.08	3.1	−3.5	
		Pb	220.353	—	0.01~0.08	3.5	−4.5	
		Au	267.594	—	0.008~0.064	2.3	−5.2	
		Fe	259.940	—	0.008~0.064	1	1.2	
		Al	396.152	—	0.008~0.064	4.3	−7.5	
		Ni	231.604	—	0.002~0.016	3.3	−4.8	
		Ag	338.289	—	0.002~0.016	6.1	−8.2	
		Cu	324.754	—	0.002~0.016	3.2	−3	
		Zn	202.548	—	0.002~0.016	1.3	−1	
		Mg	279.553	—	0.001~0.008	0.06	0	
		Mn	257.610	—	0.001~0.008	1.1	0	
金属锑	ICP-AES	Pb	220.35	0.0011	—			34
		Cu	324.75	0.0001	—			
		Bi	223.06	0.0016	—	<3.561		
		As	189.04	0.0037	—		−19.5~3.7	
		Fe	238.20	0.0007	—			
		Hg	194.32	0.0012	—			

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
纯铅	ICP-AES	Sn	189.989	0.01	—	12.5		35
		Pb	220.353	0.02	—	—		
		Mg	279.079	0.00046	—	7.1		
		Ag	328.086	0.007	—	10.9		
		Zn	202.549	0.0043	—	6.9	−8～20	
		Fe	259.940	0.0027	—	5.1		
		Cu	324.754	0.0027	—	6.6		
		Ca	393.366	0.0020	—	6.8		
高纯金属镨	ICP-AES	La	419.655	7.1	0.0020～0.20			36
		Ce	418.660	13.0	0.0030～0.30			
		Nd	444.639	17.5	0.0020～0.20	1.2～6.2	−15.0～20.0	
		Sm	446.734	10.1	0.0020～0.20			
		Y	437.494	0.73	0.00050～0.030			
白铜、亚铜-镍、果树叶	ICP-AES	As	228.81	0.002	(0.01～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	4.5	—	37
钨	ICP-AES	Al	396.152	0.015	$<0.015 \mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	38
		As	193.696	0.073	$<0.073 \mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		B	182.583	0.006	$<$(0.006～0.2) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Ca	393.366	<0.001	(0.010～0.15) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Cr	284.325	0.013	$<$(0.013～1) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Cu	327.396	0.007	(0.010～0.050) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Hg	194.167	0.003	(0.050～0.100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Fe	238.204	0.005	$<$0.005～0.500 $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		K	766.490	0.107	$<$(0.107～0.500) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Mo	203.844	0.026	$<$(0.026～1) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Na	588.995	0.008	(0.050～0.500) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Ni	232.003	0.017	$<0.017 \mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Sn	189.930	0.016	$<0.016 \mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Ti	308.802	0.020	0.070～0.600 $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		U	385.958	0.003	0.005～0.010 $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
		Zn	213.856	0.003	$<$0.003～0.010 $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	
铜、铁标准物	DCP-AES	Ge	303.906	$20 pg \cdot ml^{-1}$	—	3	3	39
高纯金属铈	ICP-AES	La	399.575	5.2	0.001～0.10	—		40
		Pr	410.075	9.8	0.003～0.30	—		
		Nd	406.109	8.2	0.001～0.10	—	−8.0～4.5	
		Sm	366.136	10.5	0.003～0.30	—		
		Y	417.754	2.2	0.001～0.10	—		
青铜	ICP-AES	Cu	324.754	—	$(0\sim600) \mu g \cdot g^{-1}$	1.0	0.6	41
		Zn	206.200	—	$(0\sim40) \mu g \cdot g^{-1}$	1.6	−4.9	
		Pb	220.353	—	$(0\sim70) \mu g \cdot g^{-1}$	1.4	0.6	
		Sn	242.949	—	$(0\sim100) \mu g \cdot g^{-1}$	1.9	1.6	
		Ni	231.604	—	$(0\sim15) \mu g \cdot g^{-1}$	1.9	0.7	
纯铂	ICP-AES	Pd	363.4	—	0.0025～0.12		−11.0	42
		Rh	343.[illegible]	—	0.0008～0.040		3.8	
		Ir	224.2	—	0.0006～0.030		0	
		Au	267.5	—	0.0006～0.030		2.6	
		Ag	328.0	—	0.0002～0.010		−15.0	
		Fe	259.9	—	0.0002～0.010		7.7	
		Ni	231.6	—	0.0006～0.030	1.6～3.9	−2.6	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
纯铂	ICP-AES	Cu	324.7	—	0.0002～0.010		0	
		Al	396.1	—	0.0008～0.040		−5.8	
		Mg	279.5	—	0.0001～0.0050		−12.0	
		Mn	257.6	—	0.0001～0.0050		−3.1	
		Zn	202.5	—	0.0002～0.010		15.0	
		Pb	220.3	—	0.0006～0.030		7.7	
高纯金属锌	ICP-AES	Cd	—	0.00016～0.00081	(0～10) $ng \cdot ml^{-1}$	<5.0	9.0	43
		Bi	—	0.000014～0.000075	(0～10) $ng \cdot ml^{-1}$	<5.0	−8.0	
高纯铱 44	ICP-AES	Rh	343.489	0.086	(0.3～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−4.5～4	44
		Pt	265.945	0.24	(1～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−6.0～14	
		Pd	324.270	0.17	(1～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−4～3	
		Au	267.595	0.063	(1～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−4～1	
高纯金属钴	ICP-AES	Al	396.15	—	—	—	—	45
		As	193.76	0.5	—	3.44	−3.3～1.7	
		Cr	267.72	0.08	—	1.17	−7.3	
		Cu	327.40	—	—	—	—	
		Fe	259.94	0.6	—	2.82	0	
		La	398.80	—	—	—	—	
		Mn	257.61	—	—	—	—	
		Ni	231.60	—	—	—	—	
		Ti	337.28	0.06	—	0.4	−0.8	
		V	311.07	0.06	—	0.3	−0.8	
		Zn	206.20	—	—	—	—	
		Zr	343.82	0.2	—	0.7	−2.4	
铝	MPI-AES	Cu	324.7	0.0031	(0.02～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	2.4	—	46
		Fe	248.3	0.0375	(0.02～100) $\mu g \cdot ml^{-1}$	2.8	—	
		Mg	285.2	0.0014	(0.005～80) $\mu g \cdot ml^{-1}$	4.5	—	
纯铅	ICP-AES	Zn	213.86	0.003	—	4.0	0	47
		Cd	214.44	0.003	—	2.0	−15.0	
		Ni	221.65	0.02	—	3.5	2.5	
		Sb	231.15	0.050	—	2.0	−5.0	
		As	234.98	0.2	—	3.4	−5.0	
		Sn	235.48	0.15	—	4.7	0	
		Fe	238.20	0.007	—	5.0	−5.0	
		Co	238.89	0.008	—	4.0	0	
		Si	251.61	0.02	—	2.6	−5.0	
		Mn	257.61	0.001	—	5.6	−4.0	
		Cr	267.72	0.007	—	3.4	−14	
		Mg	279.55	0.0001	—	7.5	−7.0	
		Bi	306.77	0.009	—	3.0	−10.0	
		Cu	324.75	0.006	—	3.5	−15	
		Ag	328.07	0.005	—	3.0	0	
		Al	396.115	0.03	—	4.4	−10.0	
纯铝及铝合金	ICP-AES	B	219.6	0.0018	—	2.9	−3.0	48
		Cd	228.8	0.0006	—	1.2	0	
		Cu	324.7	0.0016	—	0.94	−1.0	
		Fe	259.9	0.002	—	2.4	−1.0	
		Mg	279.5	0.0004	—	1.1	−3.0	
		Mn	257.6	0.0016	—	1.1	−2.0	
		Ni	231.6	0.0164	—	3.0	−3.0	
		Si	288.1	0.0066	—	2.2	−3.0	
		Ti	334.9	0.0008	—	3.4	−3.0	
		V	292.4	0.0084	—	3.3	−3.0	
		Zn	213.8	0.001	—	1.3	−2.0	
金属镁	ICP-AES	Fe	238.204	—	—	3.27	−3.0	49
		Cu	324.754	—	—	4.09	−7.0	
		Mn	257.610	—	—	2.73	−5.0	
		Al	396.152	—	—	4.59	−2.0	

续表

样品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
金属镁	ICP-AES	Si	251.611	—	—	2.96	−6.0	49
		Ni	231.604	—	—	4.80	1.0	
紫铜	ICP-AES	As	234.9		0.003～0.04	15	0	50
		Sb	259.8		0.003～0.04	10	3.0	
		Fe	296.6		0.0005～0.04	13	10	
		Pb	283.3	5～30	0.0005～0.04	14	−5.0	
		Sn	283.9		0.0005～0.04	11	2.0	
		Ni	305.0		0.0005～0.04	19	−16	
		Bi	306.7		0.0005～0.04	12	8.0	
		Zn	334.5		0.0005～0.04	17	−18	

本表参考文献：

1 光谱实验室.《光电光谱分析》之3，1993；10(增刊)：108～244
2 于爱民，张寒琦，刘晓晶等．高等学校化学学报，1993；14(1)：44
3 金钦汉，于爱民，范富良．光谱学与光谱分析，1992；12(4)：51
4 Demeny D. J Anal At Spectrom，1992；7(3)：545
5 Menendez G A，Sanchez U J E，Sanz-Medel A. J Anal At Spectrom. 1989；4(7)：581
6 Lopez M A. Ferrer A et al，Talanta. 1993；40(9)：1397
7 Ishii T，Ishibashi Y，Takeuchi C. Trans Iron Steel Inst，1984；24(6)：498
8 Coedo A G et al. J Anal At Spectrom，1993；8(6)：827
9 Alvarado J. Campos F. Ottaway J M. Talanta. 1986；33(1)：61
10 Wittmann A A. Schuster L G. Spectrochim Acta Part B，1987；42B(1/2)：413
11 Menendez G A，Garcia O C. Sanchez U J E et al. Quim Anal，1990；9(1)：33
12 朱吕田，柳鸿明，张健侣等．理化检验(化学分册)，1994；30(3)：171
13 Wuensch G. Czech N. Hegenberg O. Fresenius' Z Anal Chem，1982；310(1/2)：62
14 Walton S J. Analyst. 1986；111(2)：225
15 Umemoto M. Kubota M. Spectrochim Acta Part B. 1987，42B(3)：491
16 孙哲平．冶金分析，1994；14(6)：32
17 Coedo A G，Lopez T D et al. J Anal At Spectrom. 1992；7(2)：247
18 Hlavacek I. Hlavackova I. J Anal At Spectrom，1991；6(7)：535
19 刘爱菁．光谱实验室，1992；9(4)：28
20 Vamamoto M，Obata Y. Nitta Y et al. J Anal At Spectrom，1988；3(3)：441
21 Pavlovic M S. Pavlovic N Z. Marinkovic M. J Anal At Spectrom，1989；4(7)：589
22 庞纪士，彭祖寿．冶金分析，1992；12(3)：30
23 陈建国，金勤航，江祖成．稀土，1992；13(3)：49
24 王淑英，刘　杰．分析化学，1991；19(1)：80
25 王淑英，刘　杰．分析化学，1991；19(10)：1165
26 王淑英，潘利华，秦宗益等．分析化学，1993；21(12)：1452
27 罗锦秀，常坦彪，韩秀峰．光谱实验室，1993；10(2)：29
28 Mcleod C W. Clarke P A. Mowthorpe D J. Spectrochim Acta Patt B. 1986；41B(1/2)：63
29 Iida Y. Spectrochim Acta Part B. 1990；45B(4/5)：427
30 刘　英，陈　炜．分析试验室，1996；15(1)：71
31 张新华，李惠芬，杨玉芳．光谱实验室，1992；9(3)：30
32 冯　忠，徐　光．光谱实验室，1994；11(3)：53
33 张新华，李惠芬，杨玉芳．理化检验(化学分册)，1993；29(5)：281
34 李云浩，朱传福，付　明．分析化学，1992；20(12)：1482
35 刘毅生，卢先勇，林秀华．冶金分析，1992；12(5)：37
36 袁　甫，綦文娣．应用化学，1993；10(1)：92
37 Menendez G A，Sanchez U E，Sanz-Medel A. Anal Chim Acta，1990；234(1)：133
38 Carre M. Diaz de R O. Mermet J M et al. J Anal At Spectrom，1991；6(1)：49
39 Brindle I D，Le X，Li X. J Anal At Spectrom，1989；4(2)：227
40 袁　甫，綦文娣，陈海新．光谱学与光谱分析，1992；12(2)：75
41 内田哲男，奥山修司，伊藤义一等．分析化学(日)，1989；38(4)：T49
42 张新华，李惠芬，杨玉芳．分析化学，1991；19(10)：1199
43 Yasumasa S，Yutaka H，Masamitsu F. Fresenius' J Anal Chem，1995；353(2)：162
44 申国荣，顾燕恬，考尚铭．光谱学与光谱分析，1986；6(6)：47
45 Osamu K，Kei Y. Fresenius' J Anal Chem. 1996；354(4)：428
46 汪　英，张寒琦等．吉林冶金，1994；(1)：32
47 张坚镛，蒯诚运．广东有色金属学报，1994；4(2)：145
48 刘虎生．理化检验(化学分册)．1991；27(1)：22
49 綦景云，崔海容．理化检验(化学分册)，1993；29(4)：217
50 池　克．光谱实验室，1993；10(2)：14

表 4-14　AES 法在岩石、矿物等地质物料分析中的应用

样品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
硅铝型或硅钙型岩石、土壤、水系沉积物	ICP-AES	Ba	233.53	0.78	—	1.1～2.5	−5.7～5.8	1
		Be	313.04	0.16	—	0.77～2.6	−17.4～2.1	
		Ce	418.66	6.7	—	2.0～7.4	—	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
硅铝型或硅钙型岩石、土壤、水系沉积物	ICP-AES	Co	228.62	0.58	—	1.5~10.5	−40~3.4	1
		Cr	267.72	1.1	—	1.9~21.8	−73.4~−4.4	
		Cu	324.75	2.3	—	2.1~28.7	−7.2~9.2	
		La	408.67	1.1	—	1.6~5.2	−8.9~−0.37	
		Mn	257.61	0.67	—	1.3~20	−4.1~−0.2	
		Mo	202.03	2.9	—	15.2~117	−43.3~85.1	
		Nb	309.42	0.66	—	0.9~6.0	−8.8~27.8	
		Ni	231.60	1.3	—	1.1~24.1	−51.4~3.4	
		P	178.28	43	—	1.7~8.1	−13.7~−1.7	
		Pb	220.35	10	—	5.3~26.8	1.7~75.2	
		Sr	421.55	1.1	—	0.61~6.2	0~2.7	
		Th	401.93	5.4	—	2.6~31.5	−43.5~54.1	
		Ti	334.94	13	—	0.81~2.0	−12.5~8.2	
		V	311.07	0.69	—	0.49~2.2	−7.1~7.7	
		Y	371.03	0.33	—	1.5~4.3	−62.1~9.0	
		Zn	213.86	2.2	—	0.42~8.2	−3.4~4.0	
岩矿	离子交换树脂分离富集，ICP-AES	La	408.636	0.00335	—		−7.9	1
		Ce	418.614	0.0126	—		14.8	
		Pr	417.898	0.00996	—		11.0	
		Nd	430.306	0.00822	—		−0.5	
		Sm	442.380	0.00691	—		4.0	
		Eu	381.948	0.00081	—		−7.3	
		Gd	342.224	0.00246	—		1.5	
		Tb	350.886	0.00590	—	0.06~2.2	1.2	
		Dy	353.142	0.00156	—		7.0	
		Ho	345.580	0.00209	—		13.2	
		Er	369.218	0.00210	—		7.4	
		Tm	313.110	0.00270	—		−2.4	
		Yb	369.400	0.00050	—		6.4	
		Lu	265.156	0.00034	—		−6.7	
		Y	371.028	0.00071	—		17.3	
		Se	361.382	0.00056	—		−4.5	
地球化学样品	ICP-AES	Si	288.16	50	6.1~35.4	0.69	1.8	1
		Fe	259.94	50	0.1~24.7	1.5	4.1	
		Al	308.22	50	0.1~20.7	1.5	4.3	
		Ca	317.93	100	0.1~14.8	2.4	−2.0	
		Mg	279.08	100	0.2~25.3	1.7	4.0	
		Na	588.99	100	0.01~6.35	1.4	6.2	
		K	766.49	100	0.00~12.3	2.0	5.6	
		Mn	257.61	20	$(2.5\sim2400)\mu g \cdot g^{-1}$	0.78	−26.7	
		Ti	337.28	100	0.005~1.56	1.6	1.5	
		P	178.29	50	0.01~0.61	—	−3.6	
		Be	313.04	0.4	$(0.03\sim300)\mu g \cdot g^{-1}$	5.3	—	
		Ba	455.40	2	$(0.1\sim4000)\mu g \cdot g^{-1}$	1.2	—	
		Sr	407.77	3	$(0.4\sim4600)\mu g \cdot g^{-1}$	1.5	—	
		Co	228.62	20	$(3\sim700)\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	
		Cr	267.72	10	$(3\sim4200)\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	
		Cu	324.75	10	$(3\sim1300)\mu g \cdot g^{-1}$	17	—	
		La	398.85	10	$(2\sim1350)\mu g \cdot g^{-1}$	13	—	
		Ni	231.60	20	$(2.5\sim2400)\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	
		V	311.07	10	$(2\sim600)\mu g \cdot g^{-1}$	7.6	—	
		Zn	202.55	20	$(10\sim800)\mu g \cdot g^{-1}$	7.1	—	
		Zr	349.62	10	$(5\sim1200)\mu g \cdot g^{-1}$	3.1	—	
岩石和水系沉积物	离子交换富集-ICP-AES	Nb	309.41	0.2	$(17\sim95)\mu g \cdot g^{-1}$	3	−1.2	1
		Ta	240.06	0.4	$(1.3\sim15.3)\mu g \cdot g^{-1}$	5~11	−5.1	
岩矿	ICP-AES	Au	242.795	0.0044	—	1.5	1.2	1
黄铁矿	ICP-AES	Cu	324.700	5	—	4.18	1.1	
		Pb	283.307	30	—	4.97	−9.1	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
黄铁矿	ICP-AES	As	193.760	5	—	5.05	0.1	1
		Mn	259.374	5	—	9.8	3.5	
		Ni	300.249	20	—	3.11	11.7	
		Co	345.350	5	—	5.04	−10.8	
		Cd	228.802	5	—	4.43	−14.3	
		Zn	213.800	5	—	3.30	−1.0	
方铅矿	ICP-AES	Fe	259.940	2	—	3	—	1
		Cu	324.754	0.5	—	5	50	
		Ca	317.988	1.5	—	4.5	—	
		Mg	279.079	8	—	5.4	—	
		Al	308.215	7	—	6.5	—	
		Ti	334.941	1.5	—	10	—	
		Zn	213.856	1	—	5.7	11.4	
		Pb	220.353	5	—	0.98	−0.4	
		Co	228.616	1	—	6.1	—	
		Ni	231.604	1	—	8	—	
		Ga	294.364	1	—	—	63.6	
		In	230.606	1	—	—	36.4	
		Ge	209.426	0.5	—	8	−23.1	
		Ag	338.289	1	—	7	8.9	
		Se	196.026	1	—	10	—	
		Te	238.578	3	—	10	—	
		Sb	206.833	1	—	10.5	11.1	
		Cd	228.802	0.2	—	5	−2.6	
		Bi	223.061	0.05	—	12	−20	
		Mn	257.610	8	—	1.8	−1.3	
		As	193.696	1	—	8.9	—	
		V	292.402	1	—	—	—	
		P	214.914	3	—	10	—	
		Cr	267.716	1	—	—	—	
		Mo	202.030	0.2	—	12.9	—	
		Tl	190.864	1	—	—	—	
		Au	242.795	3	—	—	—	
金红石、钛铁矿、钛铀矿	ICP-AES	TiO_2	334.941	0.006	0~0.020	1.4~1.7	0.3	1
		Fe_2O_3	259.940	0.01	0~0.010	1.7~2.3	−2.0	
		SiO_2	251.612	0.1	0~0.002	2.7~6.9	−5.0	
		CaO	393.367	0.02	0~0.001	1.9~60	−2.0	
		MgO	279.553	0.01	0~0.0005	14~33	−4.0	
		MnO	257.610	0.005	0~0.0005	1.7~5.6	−4.0	
		P_2O_5	213.620	0.16	0~0.0005	9.9~30	−2.0	
		Al_2O_3	396.153	0.1	0~0.0005	3.8~10	2.5	
		Nb_2O_5	319.498	0.05	0~0.0005	0.1~5.8	−2.0	
		Ta	301.254	0.3	0~0.001	0.3~40	−2.0	
		Cr	267.716	0.01	0~0.0002	0.02~14	0	
		U	385.958	0.2	0~0.006	1.6	−0.7	
		Th	401.914	0.1	0~0.0006	2.0	−3.4	
				测定下限				
白钨矿	ICP-AES	Cu	324.75	20	—	1.6	1.8	1
		Zn	206.20	20	—	2.4	—	
		V	311.07	50	—	4.4	—	
		Cr	267.72	20	—	9.5	—	
		Mo	202.03	50	—	1.8	—	
		Pb	220.35	100	—	3.4	9.1	
		Sr	407.77	1	—	1.3	—	
		Al	396.15	200	—	9	—	
		Ca	393.37	50	—	0.6	0.6	
		Mg	279.55	1	—	2.9	−14.3	
		Fe	259.94	40	—	0.9	0	
		Mn	257.61	10	—	3.6	−4.5	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/($\mu g \cdot g^{-1}$)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
白钨矿	ICP-AES	Ba	455.40	5	—	0	0	1
		Si	288.16	300	—	6.4	−4.1	
		P	213.62	400	—	3.2	—	
				测定下限				
天青石	ICP-AES	MgO	279.55	0.5	—	9.48	0	1
		CaO	393.37	25	—	0.31	0.3	
		MnO	257.61	5	—	0.87	−6.8	
		Fe_2O_3	259.94	20	—	1.16	−1.7	
		SiO_2	288.16	150	—	5.36	−33.1	
		ZnO	206.20	10	—	5.21	—	
		SrO	407.77	100	—	0.35	−0.1	
		BaO	455.40	2.5	—	1.25	0	
辉锑矿（酸溶体系）	ICP-AES	Sb	206.833	—	—	1.02	−0.3	1
		Fe	259.940	0.018	—	6.1	—	
		Ca	317.989	0.088	—	7.2	−4.9	
		Mg	279.264	0.015	—	7.8	−2.0	
		Cu	324.754	0.0025	—	2.6	2.6	
		Mn	257.610	0.0016	—	10	—	
		Pb	220.353	0.026	—	8.5	−16.7	
		Zn	213.856	0.0018	—	6.7	—	
		Co	228.616	0.003	—	12.5	—	
		Ni	231.604	0.0088	—	—	—	
		Ag	338.289	0.009	—	3.8	15.0	
		In	230.606	0.03	—	4.5	—	
		Cd	228.802	0.002	—	4.7	—	
		Bi	223.061	0.025	—	6.8	—	
		As	193.696	0.037	—	—	7.4	
		Au	242.795	0.012	—	3.7	—	
		Mo	202.030	0.008	—	6.5	—	
		Ga	294.364	0.06	—	1.6	—	
		Tl	190.864	0.11	—	3.4	—	
		Se	190.026	0.03	—	4.4	1.0	
		Te	238.578	0.12	—	6.8	—	
国家岩石标样	AES	Sr	460.733	—	(1～150)$\mu g \cdot g^{-1}$	5.7	—	1
		Ba	455.404	—	(100～3000)$\mu g \cdot g^{-1}$	4.1	—	
			493.409	—	(15～500)$\mu g \cdot g^{-1}$	4.1	—	
地质样品	AES	Au	274.8	—	(0.001～10)$\mu g \cdot g^{-1}$	≤15.6	—	2
岩石化探样品	AES	Co	343.35	0.24	(0.48～100)$\mu g \cdot g^{-1}$	7.6	—	3
		Zn	334.56	1.98	(5～100)$\mu g \cdot g^{-1}$	8.07	—	
		Ag	328.07	0.013	(0.26～5)$\mu g \cdot g^{-1}$	10.28	—	
		Cu	327.45	0.10	(0.40～50)$\mu g \cdot g^{-1}$	18.29	—	
			282.44	0.10	(50～1500)$\mu g \cdot g^{-1}$	18.29	—	
		Sn	317.51	0.11	(0.22～500)$\mu g \cdot g^{-1}$	8.79	—	
		Mo	317.04	0.11	(0.22～20)$\mu g \cdot g^{-1}$	7.81	—	
		Ni	305.08	0.74	(1.48～500)$\mu g \cdot g^{-1}$	14.75	—	
		Cr	301.49	1.39	(2.78～500)$\mu g \cdot g^{-1}$	11.35	—	
		Mn	293.30	18	(18～2500)$\mu g \cdot g^{-1}$	17.81	—	
		Pb	283.30	0.78	(1.56～1000)$\mu g \cdot g^{-1}$	12.08	—	
岩矿	ICP-AES	La	384.90	—	0.02～0.5	2.06	—	4
		Ce	380.15	—	0.03～2	4.74	—	
		Eu	381.966	—	0.02～0.03	—	—	
		Yb	369.42	—	0.001～0.05	—	—	
		Sc	365.18	—	0.005～0.2	—	—	
		Y	381.83	—	0.01～0.5	—	—	
		Pr	398.21	—	0.02～2	—	—	
		Nd	380.35	—	0.2～3	—	—	
		Sm	394.09	—	0.2～1	—	—	

续表

样 品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g^{-1})	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
岩矿	ICP-AES	Gd	381.40	—	0.05~1	—	—	4
		Tb	350.92	—	0.01~0.3	—	—	
		Ho	381.07	—	0.01~0.03	—	—	
		Dy	387.21	—	0.01~0.3	2.54	—	
		Er	369.26	—	0.02~0.3	—	—	
		Tm	379.58	—	0.02~0.03	—	—	
		Lu	350.74	—	0.03~0.3	3.54	—	
地质样品	ICP-AES	Au	267.6	0.020	—	—	−2.40~0.20	5
磷矿	ICP-AES	La	408.672	—	(0.2~5)μg·ml^{-1}			6
		Ce	413.765	—	(1~30)μg·ml^{-1}			
		Pr	390.844	—	(0.3~15)μg·ml^{-1}			
		Nd	406.109	—	(0.4~20)μg·ml^{-1}			
		Sm	359.260	—	(0.3~15)μg·ml^{-1}	<10	−15~15	
		Eu	381.967	—	(0.05~2)μg·ml^{-1}			
		Gd	342.247	—	(0.2~10)μg·ml^{-1}			
		Tb	350.917	—	(0.2~10)μg·ml^{-1}			
		Dy	353.170	—	(0.1~10)μg·ml^{-1}			
		Ho	345.650	—	(0.1~5)μg·ml^{-1}			
		Er	349.910	—	(0.1~5)μg·ml^{-1}			
		Tm	346.220	—	(0.1~5)μg·ml^{-1}			
		Yb	369.419	—	(0.03~1.5)μg·ml^{-1}	<10	−15~15	
		Lu	339.707	—	(0.3~10)μg·ml^{-1}			
		Y	371.030	—	(0.04~3)μg·ml^{-1}			
		Sc	361.384	—	(0.05~1.5)μg·ml^{-1}			
铁矿	ICP-AES	Al	396.15	0.42	—	0.5		7
		Ca	393.37	0.0051	—	1.3		
		Mg	280.27	0.0022	—	0.7		
		Mn	257.61	0.12	—	0.5	−5~3	
		Co	228.61	0.049	—	0.5		
		Cu	327.40	0.044	—	1.3		
		Na	589.59	0.039	—	1.2		
		K	766.49	0.056	—	0.6		
地质样品	AES	Au	267.5	0.0002	(0.001~0.3)μg	13.8	—	8
		Pt	265.9	0.00006	(0.0003~0.050)μg	11.8	—	
		Pd	340.5	0.00006	(0.0003~0.050)μg	10.5	—	
		Rh	343.4	0.00006	(0.0003~0.050)μg	9.6	—	
		Ir	292.4	0.0006	(0.003~0.3)μg	14.5	—	
		Os	290.9	0.0006	(0.003~0.3)μg	14.8	−7~4	
		Ru	349.9	0.00006	(0.0003~0.050)μg	11.3	−7~4	
绿柱石	ICP-AES	Be	313.00	—	—			9
		Si	251.60	—	—			
		Al	308.20	—	—			
		Fe_2O_3	259.90	0.33	—	≤7.4	−1~9	
		MgO	279.00	3.0	—			
		CaO	317.90	1.2	—			
		TiO_2	334.90	0.14	—			
		MnO	259.30	0.03	—			
岩石、土壤	ICP-AES	B	249.678	0.0008	—	2.8~3.4	>−2	10
地质材料	ICP-AES	Bi	223.031	0.056	0~100	1.5~2.2	—	11
精铜矿	ICP-AES	Ge	265.118	0.25	—	0.92	−3.7	12
锌渣	ICP-AES	Ge	265.118	0.25	—	0.71	−2.8	
地质材料	ICP-AES	B	249.773	0.0012	—	1~2	−2~2	13
地质材料	FIA-ICP-AES	La	—	0.1	(1~100)μg·g^{-1}	5.6	−8.0	14
		Ce	—	0.2	(1~100)μg·g^{-1}	5.7	−4.0	
		Pr	—	0.2	(1~100)μg·g^{-1}	4.5	−11.0	
		Nd	—	0.3	(2~100)μg·g^{-1}	3.9	−10.0	
		Sm	—	0.4	(4~100)μg·g^{-1}	4.4	−9.0	
		Eu	—	0.1	(1~100)μg·g^{-1}	2.1	−5.0	

续表

样品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
地质材料	FIA-ICP-AES	Gd	—	0.5	$(5\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	6.2	−2.0	14
		Tb	—	0.05	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	1.3	2.0	
		Dy	—	0.1	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	4.8	−7.0	
		Ho	—	0.1	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	7.2	−6.0	
		Er	—	0.2	$(2\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	5.8	−12.0	
		Tm	—	0.1	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	2.4	−15.0	
		Yb	—	0.1	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	6.7	−15.0	
		Lu	—	0.1	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	7.1	−10.0	
		Y	—	0.1	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	3.9	−3.0	
页岩	ICP-AES	Ca	396.84	0.06	—	0.9~1.6	—	15
		Mg	383.23	0.03	—	1.6	—	
		Fe	259.94	0.008	—	0.6~1.7	—	
		Al	308.22	0.02	—	1.6~1.9	—	
		Mn	257.61	0.0008	—	0.45~2.0	—	
		Cu	324.75	0.002	—	1.7~2.1	—	
		Pb	221.35	0.03	—	1.7~3.5	—	
		Cr	262.72	0.004	—	0.45~1.8	—	
		Co	228.62	0.003	—	1.7~2.7	—	
		Ni	231.60	0.01	—	0.6~1.5	—	
		Zn	213.86	0.002	—	2.0~2.4	—	
		Sr	421.55	0.001	—	0.9~2.5	—	
		Cd	228.80	0.005	—	0.8~1.6	—	
		Ba	493.41	0.002	—	1.0~1.3	—	
		V	292.40	0.003	—	0.4~1.8	—	
		As	197.20	0.007	—	0.008~5.6	—	
		Mo	202.03	0.01	—	0.8~4.6	—	
		Ti	334.94	0.0001	—	0.5~1.5	—	
		PO_4	214.91	0.3	—	1.2~3.8	—	
地质标样	DCP-AES	Au	242.795	0.006	$(0.01\sim100)\mu g \cdot ml^{-1}$	0.8~1.5	0	16
硅酸盐地质物料	AES	B	249.677	11	—	4.9	—	17
固体和矿石	DCP-AES	Cu	—	100	<0.3	3~10	—	18
硅酸盐岩石	AES	Li	670.78	2.8pg	$\leqslant 0.02\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	19
地质样品	DCP-AES	Li	670.78	—	$(1\sim1500)\mu g \cdot g^{-1}$	3.1~6.3	—	20
				测定下限				
地质样品	AES	Ag	328.068	0.02	$(0.02\sim5)\mu g \cdot g^{-1}$		—	21
			328.289		$(0.05\sim10)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
		Cu	327.395	1	$(1\sim30)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
			282.437		$(30\sim5000)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
		Pb	282.199	3	$(5\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
			283.306		$(3\sim300)\mu g \cdot g^{-1}$	—3~10	—	
		Zn	334.502	10	$(10\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
		W	294.698	2	$(2\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
		Sn	317.505	1	$(1\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
		Bi	306.772	0.3	$(0.3\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
		Mo	317.035	0.3	$(0.3\sim60)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
岩金矿样	AES	As	286.0	—	0.03~1	4.6~24.0	—	22
		Sb	316.8	—	0.05~0.8	4.7~15.4	—	
地质样品	AES	W	429.46	0.4	$(0.4\sim50)\mu g \cdot g^{-1}$	8.7	10.0	23
		Mo	317.035	0.21	$(0.2\sim20)\mu g \cdot g^{-1}$	10.7	28.1	
		Sn	317.50	0.16	$(0.2\sim100)\mu g \cdot g^{-1}$	7.5	12.1	
		Pb	283.307	0.94	$(1\sim200)\mu g \cdot g^{-1}$	5.5	2.2	
		Bi	306.772	0.18	$(0.2\sim50)\mu g \cdot g^{-1}$	12.5	7.7	
毒砂单矿物	ICP-AES	As	193.696	—	—	1.03	—	24
		Fe	259.940	—	—	0.95	4	
		Ca	317.989	0.099	—	9.6	10	
		Mg	279.264	0.045	—	4.9	−2	
		Cu	324.754	0.005	—	3.3	−8	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/($\mu g \cdot g^{-1}$)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
毒砂单矿物	ICP-AES	Mn	257.610	0.008	—	6.6	2	24
		Pb	220.353	0.005	—	3.5	5	
		Zn	213.856	0.008	—	5.1	1	
		Co	228.616	0.01	—	3.9	−2.2	
		Ni	231.606	0.02	—	7.6	−0.6	
		Ag	338.289	0.01	—	4.5	−1	
		Ga	294.364	0.03	—	3.5	2	
		Sb	206.833	0.028	—	4.6	−0.2	
		Bi	223.061	0.03	—	6.1	−3.1	
		In	230.606	0.04	—	10.5	−3	
		Cd	228.802	0.02	—	2	−0.4	
		Au	242.793	0.03	—	11	4	
		Tl	190.864	0.1	—	3.2	−3	
		Se	190.026	0.03	—	6	−1	
		Te	238.578	0.09	—	9.5	−5	
碳酸盐岩石	AES	Be	234.86	0.24	(0.24～100)$\mu g \cdot g^{-1}$	6.9	—	25
		B	249.77	2.2	(2.2～500)$\mu g \cdot g^{-1}$	8.9	—	
		Sn	284.00	0.45	(0.5～100)$\mu g \cdot g^{-1}$	8.0	—	
		Mo	317.04	0.321	(0.21～100)$\mu g \cdot g^{-1}$	9.1	—	
		Ag	328.07	0.04	(0.04～10)$\mu g \cdot g^{-1}$	5.2	—	
		Pb	283.31	2.4	(2.4～1000)$\mu g \cdot g^{-1}$	8.2	—	
		Ga	294.42	2.8	(2.8～500)$\mu g \cdot g^{-1}$	9.6	—	
		Cu	327.40	2.0	(2～20)$\mu g \cdot g^{-1}$	9.9	—	
锆英石	ICP-AES	ZrO_2	343.80	—	—	0.7	3.0	26
		SiO_2	251.60	—	—	0.8	2.0	
		Nb_2O_5	316.34	0.0021	—	6.9	4.0	
		TiO_2	334.80	0.022	—	1.5	−3.0	
		CaO	317.93	0.012	—	5.1	14	
		Al_2O_3	308.20	0.0055	—	3.8	5.0	
		MnO	257.61	0.0002	—	11.8	−3.0	
		MgO	279.08	0.0067	—	17.2	44	
		Fe_2O_3	259.80	0.0022	—	6.2	−9.0	
		La_2O_3	408.10	0.0004	—	1.2	−3.0	
		Y_2O_3	371.00	0.0004	—	1.2	−7.0	
		BeO	313.04	0.0002	—	3.9	−8.0	
		P_2O_5	214.91	0.016	—	10.7	—	
		C	247.856	—	—	—	—	
		Tl_2O_3	276.79	0.017	—	18.8	−2.0	
		Sn	303.41	0.017	—	6.8	−2.0	
		HfO_2	339.98	0.006	—	3.9	2.0	
		ThO_2	401.80	0.002	—	4.8	8.0	
		Lu_2O_3	261.536	0.012	—	11.5	7.0	
		Gd_2O_3	342.211	0.036	—	4.9	—	
		Ho_2O_3	345.543	0.016	—	8.6	—	
		Tm_2O_3	346.180	0.027	—	4.7	—	
		Tb_4O_7	350.882	0.07	—	—	—	
		Dy_2O_3	353.131	0.019	—	1.9	—	
		Sc_2O_3	361.356	0.0008	—	2.5	—	
		Er_2O_3	369.211	0.048	—	1.4	—	
		Yb_2O_3	369.364	0.005	—	1.8	—	
		Nd_2O_3	406.696	0.11	—	3.4	—	
		Eu_2O_3	412.961	0.012	—	14.6	—	
		CeO_2	418.616	0.18	—	11.5	—	
		Pr_4O_7	440.921	0.18	—	11.6	—	
		Sm_2O_3	442.445	0.03	—	11.3	—	
辉钼矿	AES	Re	346.047	0.2～1	—	5.7～14.38	—	27
地质材料	AES	Au	267.59	0.0002	(0.0005～0.05)$\mu g \cdot g^{-1}$	5～20	3.92～6.25	28
电炉灰、地质标样	ICP-AES	Co	—	5	(0～2.5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	0.50	0	29
		Cu	—	15	(0～25)$\mu g \cdot ml^{-1}$	1.06	−40	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g\cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
电炉灰、地质标样	ICP-AES	Pb	—	70	(0~25)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.80	0	29
		Sn	—	50	(0~2.5)$\mu g\cdot ml^{-1}$	2.00	−20	
		Zn	—	30	(0~25)$\mu g\cdot ml^{-1}$	1.69	0	
		Zr	—	7	(0~2.5)$\mu g\cdot ml^{-1}$	1.20	−30	
		Cd	—	6	(0~2.5)$mg\cdot ml^{-1}$	2.07	0	
		W	—	—	—	1.19	−40	
地质材料	ICP-AES	P	178.225	0.05	(170~1100)$\mu g\cdot g^{-1}$	2.5	—	30
		Mo	202.030	0.006	(0.2~2.6)$\mu g\cdot g^{-1}$	14	—	
		W	207.911	0.015	(0.1~1.8)$\mu g\cdot g^{-1}$	7	—	
		B	249.773	0.002	(3~100)$\mu g\cdot g^{-1}$	2.5	—	
		Cr	267.716	0.004	(4~2980)$\mu g\cdot g^{-1}$	6	—	
		V	311.838	0.005	(20~250)$\mu g\cdot g^{-1}$	2.4	—	
岩石	AES	Sr	460.73	—	0.0015~0.5	8.5	−6~10	30
		Ba	455.40	—	0.0005~1	6.3	−6~10	
矿物	ICP-AES	Ta	268.511	0.05	$Ta_2O_5$0.0003~2.5	—	—	31
		Nb	295.088	0.05	$Nb_2O_5$0.0003~2.5	—	—	
岩石	ICP-AES	B	249.77	1~2	—	2~3	−3.0	32
锆石	ICP-AES	P_2O_5	214.91	0.36	—	1.64~	3.36—33	
化探试样	AES	Y	319.56	3.5	(3~5)$\mu g\cdot g^{-1}$			34
		Nb	316.34	5	(5~500)$\mu g\cdot g^{-1}$			
		Zr	327.30	2	(2~100)$\mu g\cdot g^{-1}$			
		La	324.51	5	(20~500)$\mu g\cdot g^{-1}$			
		Mn	304.46	10	(10~10000)$\mu g\cdot g^{-1}$	1~13.9	±10~±20	
		Ti	284.19	72	(100~10000)$\mu g\cdot g^{-1}$			
		Be	313.04	0.5	(0.5~100)$\mu g\cdot g^{-1}$			
		V	327.61	6	(5~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$			
		Cr	301.48	5.7	(5~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$			
地质化探样品	AES	Ag	328.07	0.028	(0.028~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$	8.95	—	35
		B	249.77	3.2	(3.2~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$	6.74	—	
		Co	345.35	0.38	(0.38~320)$\mu g\cdot g^{-1}$	7.08	—	
		Cr	301.49	1.8	(1.8~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$	5.30	—	
		Mo	317.03	0.1	(0.1~32)$\mu g\cdot g^{-1}$	7.75	—	
		Ni	305.09	2.5	(2.5~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$	6.11	—	
		Pb	283.31	1	(1~100)$\mu g\cdot g^{-1}$	9.12	—	
		Sn	317.50	0.37	(0.37~320)$\mu g\cdot g^{-1}$	4.06	—	
		V	318.54	0.15	(0.15~100)$\mu g\cdot g^{-1}$	7.84	—	
		W	294.70	0.6	(0.6~320)$\mu g\cdot g^{-1}$	9.94	—	
化探试样	AES	As	234.98	3	(1~100)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	36
			278.02		(1~300)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
		Sb	259.81	0.32	(0.3~100)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
			287.79		(1~100)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
		Bi	306.77	0.16	(0.03~3)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
			289.80		(1~30)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
		Cu	327.40	0.28	(1~100)$\mu g\cdot g^{-1}$	6.68~34.94	—	
			282.44		(100~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
		Pb	266.32	1.0	(3~100)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
			240.19		(100~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
		Zn	307.51	4.0	(10~300)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
			277.10		(100~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
		Sn	303.41	0.11	(0.1~10)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
			266.12		(10~300)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	
化探试样	AES	Pb	283.31	1.0	(1~100)$\mu g\cdot g^{-1}$	7.2	—	37
		Sn	284.00	0.37	(0.37~320)$\mu g\cdot g^{-1}$	3.7	—	
		Cr	301.49	1.8	(1.8~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$	3.5	—	
		Ni	305.08	2.5	(2.5~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$	4.0	—	
		Mo	317.03	0.1	(0.1~32)$\mu g\cdot g^{-1}$	5.2	—	
		Co	345.35	0.38	(0.38~320)$\mu g\cdot g^{-1}$	9.5	—	
化探试样	AES	Cu	327.45	1.0	(2~50)$\mu g\cdot g^{-1}$	4.2~8.9	—	
			282.43		(50~1000)$\mu g\cdot g^{-1}$		—	38

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/($\mu g \cdot g^{-1}$)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
化探试样	AES	Pb	283.31	1.0	$(2\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$	2.1～18.0	—	38
			287.33		$(100\sim1000)\mu g \cdot g^{-1}$		—	
		Zn	334.5	7.8	$(10\sim1000)\mu g \cdot g^{-1}$	3.9～12.1	—	
		Ag	328.07	0.03	$(0.02\sim10)\mu g \cdot g^{-1}$	3.9～9.0	—	
		Sn	317.50	0.5	$(0.2\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$	2.9～20.8	—	
		Ni	341.48	2.0	$(2\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$	3.5～19.2	—	
		Cr	301.48	3.5	$(2\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$	2.1～9.5	—	
		Co	345.35	1.4	$(2\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$	3.1～11.1	—	
		Mn	293.4	22	$(20\sim5000)\mu g \cdot g^{-1}$	2.3～34	—	
		V	326.77	6	$(2\sim500)\mu g \cdot g^{-1}$	2.1～17.7	—	
土壤	DCP-AES	SiO_2	251.6	0.026	53～81	0.69	−0.9～1	39
		Fe_3O_4	259.9	0.077	1.9～7.5	0.99	−1.7～−0.2	
		Al_2O_3	236.7	0.29	7.4～16	1.3	−0.4～3	
		CaO	315.9	0.017	0.15～7.4	2.4	−1.1～0	
		MgO	279.5	0.0004	0.19～4.5	1.4	−0.5～1	
		TiO_2	337.2	0.009	0.22～1.0	1.3	−8.5～−0.2	
		MnO	257.6	0.001	0.030～0.14	1.2	−3.5～0	
		K_2O	404.4	0.24	2.5～5.0	1.8	−3～3	
		Na_2O	568.8	0.15	0.29～3.6	6.5	−7～4	
		P_2O_5	214.9	0.094	0.087～0.38	6.3	−1～4	
土壤	ICP-AES	Cd	228.8	0.00149	—	<1	7	40
		Mo	313.3	0.00409	—	<1	11.8	
河流沉积物	ICP-AES	Al	308.21	0.0092	—	1.3	−14.7	1
		Ba	455.40	0.0003	—	3.5		
		Be	313.04	0.0003	—	4.4	—	
		Ca	393.36	0.0007	—	1.1	6.3	
		Cd	226.50	0.0028	—	—	—	
		Co	228.61	0.0021	—	—	—	
		Cr	267.71	0.0038	—	1.5	—	
		Cu	324.75	0.0003	—	2.9	−1.0	
		Fe	238.20	0.0042	—	1.1	−1.8	
		K	766.49	0.017	—	—	—	
		Mg	279.55	0.0003	—	1.2	—	
		Mn	257.61	0.0009	—	1.3	−5.8	
		Mo	202.03	0.0083	—	—	—	
		Ni	231.60	0.020	—	3.0	—	
		Na	589.59	0.006	—	—	−3.5	
		Pb	220.35	0.072	—	—	—	
		Sr	421.55	0.0002	—	2.3	−7.3	
		Ti	336.12	0.001	—	1.8	−14.4	
		V	292.40	0.0016	—	2.0	−2.0	
		Zn	213.85	0.014	—	3.8	−4.4	
沉积物	ICP-AES	Cd	—	0.01	—	6.5	0.4	41
		Cu	—	8	—	7.1	0.0	
		Hg	—	0.01	—	4.9	0.0	
		Mn	—	0.3	—	7.4	−0.4	
		Pb	—	0.07	—	5.2	0.5	
		Zn	—	0.02	—	6.7	18	
水系沉积物	ICP-AES	As	193.68	0.11	—	3.14	−1.1	1
		Sb	206.85	0.07	—	1.92	2.5	
		Bi	223.06	0.08	—	4.61	−0.6	
水系沉积物土壤	ICP-AES	Se	196.3	0.04	—	2.7	9.1	1
海底沉积物	ICP-AES	Ca	317.93	0.075	$(7.5\sim17000)mg \cdot L^{-1}$	2.3	9	1
		Mg	279.08	0.075	$(7.5\sim13000)mg \cdot L^{-1}$	1.3	−11	
		Fe	259.90	0.075	$(7.5\sim35000)mg \cdot L^{-1}$	1.2	2	
		Ti	313.08	0.01	$(1.0\sim5000)mg \cdot L^{-1}$	1.0	−1	
		Ba	233.53	0.01	$(1.0\sim500)mg \cdot L^{-1}$	0.68	−1	
		Co	345.30	0.005	$(0.5\sim500)mg \cdot L^{-1}$	1.4	0	
		Ni	231.60	0.005	$(0.5\sim50)mg \cdot L^{-1}$	2.0	0	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/($\mu g \cdot g^{-1}$)	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
海底沉积物	ICP-AES	Zn	334.50	0.005	(0.5～500)mg·L^{-1}	1.4	8	1
		B	249.77	0.0025	(0.25～100)mg·L^{-1}	1.6	−16	
水系沉积物	ICP-AES	Ag	328.1	0.0005	(0.004～5)μg·ml^{-1}	3.5	—	42
水系沉积物	ICP-AES	Be	234.8	0.038	(0.1～80)μg·ml^{-1}	2.8	—	43
		Cr	357.9	0.030	(0.1～220)μg·ml^{-1}	2.2	—	
		Mo	379.8	0.015	(0.05～140)μg·ml^{-1}	3.3	—	
		V	437.9	0.030	(0.1～200)μg·ml^{-1}	3.8	—	
		Zr	343.8	0.024	(0.05～100)μg·ml^{-1}	2.3	—	
		Ge	209.4	0.11	(1.0～240)μg·ml^{-1}	4.6	—	
海洋沉积物	ICP-AES	Cd	228.8	0.068	(0.006～200 ng	3.5	—	44
		Pb	217.0	3.1	(0.31～25)ng	10.5	—	
海洋沉积物	ICP-AES	Al	308.21	0.0092	—	0.12	—	45
		Ba	455.46	0.0003	—	6.92	—	
		Ca	393.36	0.0007	—	0.03	—	
		Cd	226.50	0.0028	—	—	—	
		Co	228.61	0.0021	—	—	—	
		Cr	267.71	0.0038	—	0.96	—	
		Cu	324.75	0.0003	—	0.26	—	
		Fe	238.20	0.0042	—	0.09	—	
		K	766.49	0.017	—	0.07	—	
		Mg	279.55	0.0003	—	0.06	—	
		Mn	275.61	0.0009	—	1.01	—	
		Ni	231.60	0.020	—	1.39	—	
		Na	258.59	0.0060	—	0.05	—	
		Sr	421.55	0.0002	—	0.44	—	
		Ti	336.12	0.0010	—	0.005	—	
		V	292.40	0.0016	—	—	—	
		Zn	213.85	0.0014	—	0.49	—	
沉积物标准参考样	ICP-AES	Pb	283.3	0.00012 μg	—	6.2	—	46
泥炭腐质酸	ICP-AES	Fe	517.00	0.004	—	—	−6.5～1	47
		Mg	321.00	0.002	—	—	−5.5～3	
		Ca	301.00	0.001	—	—	−6.5～3	
		Zn	477.00	0.004	—	—	−6.5～3	
		Cu	599.00	0.004	—	—	−4.4～5	
		P	787.00	0.02	—	—	−4.8～1	
		Mn	564.00	0.01	—	—	0～5	
		Co	810.00	0.002	—	—	−7.1～−3.5	
		Ti	308.00	0.03	—	—	0.5～5	
		Na	589.00	0.002	—	—	−7.1～−5.4	
		K	404.7	0.01	—	—	−4.6～−0.3	
粘土矿物	ICP-AES	Na	589.592	0.05	—	0.98	2.0	48
		Cu	324.754	0.02	—	0.69	2.0	
		Al	309.271	0.07	—	0.56	−1.0	
		Pb	280.199	0.05	—	0.82	−3.0	
		Si	251.611	0.05	—	0.61	−2.0	
		Ca	396.847	0.04	—	0.51	−2.0	
		Mn	259.373	0.02	—	0.40	−1.0	
		Mg	279.553	0.03	—	0.39	3.0	
		Fe	259.940	0.06	—	0.19	2.0	
		Zn	202.548	0.06	—	1.63	−2.0	
地质样品	ICP-AES	CeO_2	413.7	—	(1～20)μg·ml^{-1}			49
		Nd_2O_3	406.1	—	(0.25～10)μg·ml^{-1}			
		Pr_6O_{11}	381.6	—	(0.25～10)μg·ml^{-1}			
		Eu_2O_3	372.5	—	(0.1～5)μg·ml^{-1}			
		Er_2O_3	369.2	—	(0.1～5)μg·ml^{-1}			
		Sm_2O_3	356.1	—	(0.25～10)μg·ml^{-1}			
		Tb_4O_7	350.9	—	(0.1～10)μg·ml^{-1}			
		Lu_2O_3	350.7	—	(0.1～10)μg·ml^{-1}	3.38～8.39	−10～5	
		Tm_2O_3	346.2	—	(0.025～5)μg·ml^{-1}			

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g\cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
地质样品	ICP-AES	Ho_2O_3	245.6	—	$(0.025\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$			49
		Gd_2O_3	342.2	—	$(0.1\sim10)\mu g\cdot ml^{-1}$			
		Dy_2O_3	340.7	—	$(0.1\sim10)\mu g\cdot ml^{-1}$			
		Sc_2O_3	335.3	—	$(0.025\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$			
		Y_2O_3	332.7	—	$(0.025\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$			
		Yb_2O_3	328.5	—	$(0.01\sim2.5)\mu g\cdot ml^{-1}$			
		La_2O_3	324.5	—	$(0.25\sim20)\mu g\cdot ml^{-1}$			
土壤	ICP-AES	Ca	317.930	0.002	$(4.0\sim128)\mu g\cdot ml^{-1}$	2.1	−53	50
		Mg	279.080	0.008	$(1.0\sim16.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	1.5	−33	
		K	766.490	0.035	$(1.0\sim32.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	0.74	−19	
		Na	589.590	0.019	$(0.5\sim8.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	1.2	−18	
		Al	308.210	0.008	$(10.0\sim80.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	5.4	−63	
		P	178.290	0.020	$(1.0\sim10.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	2.2	−10	
		S	182.040	0.010	$(0.5\sim5.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	8.0	−13	

本表参考文献：

1 光谱实验室.《光电光谱分析》之3，1993；10(增刊)：250～312
2 付永立.地质实验室，1994；10(2)：98
3 马克林，吴碧君.地质实验室，1994；10(4/5)：283
4 王英滨.地质实验室，1995；11(2)：73
5 陈梅一，张明恭，杨麟等.矿物岩石.1995；15(1)：98
6 张义冬，刘贵标，韩英辉等.冶金分析，1994；14(1)：53
7 王家风，魏永巨，任建民等.光谱学与光谱分析，1992；12 (1)：72
8 尚德昌，董　岩.光谱学与光谱分析，1993；13 (3)：35
9 段玉然，李维华，徐羽栖.分析化学，1994；22 (4)：366
10 张永盛，谭雪英.分析试验室，1993；12 (5)：61
11 关维俊，李德芳，张兰等.分析测试学报，1993；12 (5)：55
12 Peramaki P, Korvala V M, Lajunen L H J. Anal Proc, 1989; 26 (7): 255
13 Lin S, Peng C. J Anal At Spectrom, 1990; 5 (6): 509
14 Satyanarayana K, Ramanaiah G V, Girija S et al. At Spectrosc, 1995; 16 (6): 235
15 Liang Yan Z, Yin Ning W. At Spectrosc, 1995; 16 (6): 243
16 Smolander K, Kauppinen M. Anal Chim Acta, 1991; 248 (2): 569
17 Baucells M, Lacort G, Roura M et al. Appl Spectrosc, 1984; 38 (4): 572
18 Mitchell P G, Ruggles J A, Sneddon J et al. Anal Lett, 1985; 18 (A14): 1723
19 Zhang L, Hu S. Int lab, 1986; 16 (4): 28
20 陈俊芬.光谱学与光谱分析，1996；16 (3)：79
21 丁宝卿.光谱学与光谱分析，1996；16 (2)：48
22 文燕良.理化检验（化学分册），1990；26 (2)：113
23 柳本乐.理化检验（化学分册），1992；28 (5)：282
24 曾惠芳.岩矿测试，1992；11 (3)：211
25 张文华，张　芳.岩矿测试，1995；14 (1)：37
26 张永盛.岩矿测试，1994；13 (2)：121
27 吴景钟，李雅英.分析测试通报，1986；5 (4)：45
28 Xu P. J Anal At Spectrom, 1992; 7 (5): 775
29 Wittmann A A, Kop F R. Spectrochim Acta Part B, 1987; 42B (1/2): 417
30 Hall G E M, Pelchat J C. Analyst, 1986; 111 (11): 1255
31 韩乃才，丁志敏.分析化学，1986；14 (2)：132
32 鲁明新，于桂香.稀有金属，1986；5 (4)：292
33 Walsh J N. Analyst, 1985, 110 (8): 959
34 Farinas J C. Anal Chem, 1989; 61 (24): 2696
35 曹文辉，英虹.理化检验(化学分册)，1994；30(6)：345
36 林昌森，毛春爱.理化检验（化学分册），1988；24 (2)：100
37 晏　实，胡雪雅.光谱学与光谱分析，1993；13 (4)：123
38 张明恭，陈梅一，苏勇.矿物岩石，1993；13 (1)：115
39 英　虹.地质实验室，1994；10 (4/5)：280
40 Bauells M, Lacort G, Roura M. Analyst, 1985; 110 (12): 1423
41 Blain L, Salin E D. Spectrochim Acta Part B, 1992; 47B (2): 205
42 于爱民，刘小晶，张寨琦等.仪器仪表与分析监测，1992；(1)：43
43 张晓惠，侯明轶，金钦汉等.岩矿测试，1992；11 (3)：221
44 Sturgeon R E, Willie S N, Luong V T et al. J Anal At Spectrom, 1990; 5 (7): 635
45 刘春兰，孙雅茹，曾宪津.光谱实验室，1993；10 (4)：9
46 于爱民，范富良，金钦汉.高等学校化学学报，1992；13 (2)：175
47 祝亚勤，王宏杰，张立红.腐植酸.1995；(1)：32
48 Lilli P, Paavo P, Lauri H J et al. At Spectrosc, 1995; 16 (6): 248
49 杨世德，张永盛，谭雪英.理化检验(化学分册)，1988；24 (4)：202
50 Somasiri L L W, Birnie A, Edwards A C. Analyst, 1991; 116 (6): 601

表 4-15　AES 法在稀土、石油化工等领域的应用

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g\cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
氧化钆	ICP-AES	Sm	363.429	测定下限 10	$(10\sim320)\mu g\cdot g^{-1}$	2.83	6.0	1
		Eu	381.970	2	$(2\sim128)\mu g\cdot g^{-1}$	0.52	0.0	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g^{-1})	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
氧化钆	ICP-AES	Tb	387.420	20	(20～640)μg·g^{-1}	1.83	9.0	1
		Dy	353.170	4	(4～128)μg·g^{-1}	4.14	−18.0	
		Yb	289.134	1	(1～68)μg·g^{-1}	4.92	−12.9	
		Cr	284.322	6.2	(6.2～400)μg·g^{-1}	1.99	−12.8	
		Co	228.620	3	(3～200)μg·g^{-1}	1.34	−0.7	
		Cd	228.800	0.6	(0.6～40)μg·g^{-1}	2.70	−2.0	
		Cu	224.700	1.4	(3.2～200)μg·g^{-1}	2.31	0.3	
		Ca	393.366	1.6	(6.2～400)μg·g^{-1}	1.17	−12.0	
		Mn	257.610	6.2	(1.4～100)μg·g^{-1}	0.97	1.6	
		Mo	203.840	3.2	(6.2～400)μg·g^{-1}	2.56	3.0	
		Mg	280.270	6.2	(6.2～400)μg·g^{-1}	0.115	3.0	
		Ni	231.600	6.2	(1.6～100)μg·g^{-1}	6.91	−0.8	
		Ti	323.450	6.2	(6.2～400)μg·g^{-1}	0.85	0.2	
		Ta	240.060	6.2	(6.2～400)μg·g^{-1}	4.04	0.4	
		V	289.330	6.2	(6.2～400)μg·g^{-1}	1.52	4.4	
		Ba	493.410	6.2	(6.2～400)μg·g^{-1}	4.79	7.6	
高纯氧化铒	ICP-AES	Pr	422.53	6.7	0.0010～0.10	6.2	10.0	2
		Sm	356.83	9.1	0.0010～0.10	4.5	−6.7	
		Dy	379.85	11.0	0.0020～0.20	5.4	−10.0	
		Ho	389.80	9.7	0.0020～0.20	6.8	20.0	
		Tm	379.58	5.9	0.0020～0.20	4.4	−16.7	
		Y	378.87	2.7	0.00080～0.080	5.9	16.7	
氧化铒	AES	Eu_2O_3	420.505	1.5	0.00015～0.015	14.40	−5.6	3
		Y_2O_3	332.788	5	0.0005～0.15	2.94	−5.7	
		Tm_2O_3	336.262	6	0.0006～0.20	7.25	−9.0	
		La_2O_3	433.374	10	0.001～0.1	6.08	−1.2	
		Ho_2O_3	345.600	10	0.001～0.20	6.54	8.8	
		Dy_2O_3	346.097	15	0.0015～0.50	6.98	0.0	
		Yb_2O_3	328.937	15	0.0015～0.05	15.51	−6.1	
		Lu_2O_3	335.958	20	0.002～0.20	13.34	6.8	
		Ce_2O_3	422.260	30	0.003～1.00	8.40	−6.3	
		Nd_2O_3	430.357	30	0.003～0.3	3.59	−4.9	
		Sm_2O_3	330.637	50	0.005～0.5	7.34	7.1	
		Pr_6O_{11}	422.298	60	0.006～0.60	9.28	4.1	
		Gd_2O_3	335.048	60	0.006～0.60	3.82	5.0	
		Tb_4O_7	432.647	60	0.006～2.00	16.18	−2.0	
高纯氧化铥	ICP-AES	La	412.323	0.020	(0.04～0.80)μg·ml^{-1}	6.7	13.0	4
		Ce	393.109	0.360	(1.0～20.0)μg·ml^{-1}	0.83	−4.3	
		Pr	406.281	0.200	(0.80～16.0)μg·ml^{-1}	3.0	10.0	
		Nd	415.608	0.050	(0.06～1.2)μg·ml^{-1}	2.4	−0.4	
		Sm	442.434	0.080	(0.6～12.0)μg·ml^{-1}	2.9	−13.3	
		Eu	397.196	0.004	(0.01～1.6)μg·ml^{-1}	0.70	1.0	
		Gd	376.839	0.020	(0.10～2.0)μg·ml^{-1}	1.0	10.0	
		Tb	370.286	0.200	(0.40～8.0)μg·ml^{-1}	1.4	17.0	
		Dy	353.170	0.025	(0.80～16.0)μg·ml^{-1}	1.0	1.0	
		Ho	389.102	0.100	(0.40～8.0)μg·ml^{-1}	0.86	15.0	
		Er	337.271	0.050	(0.20～4.0)μg·ml^{-1}	0.81	−11.2	
		Yb	328.937	0.500	(1.20～24.0)μg·ml^{-1}	0.39	−1.3	
		Lu	339.707	0.035	(0.06～1.2)μg·ml^{-1}	0.81	−4.0	
		Y	371.030	0.010	(0.04～0.80)μg·ml^{-1}	1.0	4.0	
高纯氧化铈	ICP-AES	La	338.10	—	0.0040～0.2560	4.5	−15.6	5
		Pr	422.54	—	0.0160～0.2560	2.3	−12.5	
		Nd	406.11	—	0.0060～0.1920	4.0	−2.1	
		Sm	392.29	—	0.0040～0.2560	5.4	−10.9	
		Eu	381.97	—	0.0010～0.0134	4.7	−6.2	
		Gd	364.62	—	0.0040～0.1280	1.6	−6.2	
		Tb	332.44	—	0.0040～0.2560	4.8	−7.8	
		Dy	340.78	—	0.0025～0.0800	4.2	−10.0	
		Ho	345.60	—	0.0008～0.0256	4.4	−5.6	
		Er	337.28	—	0.0015～0.0900	3.1	8.3	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
高纯氧化铈	ICP-AES	Tm	336.26	—	0.0008～0.0256	7.2	−15.6	5
		Yb	369.42	—	0.0008～0.0256	4.9	−6.2	
		Lu	347.20	—	0.0030～0.0960	5.8	8.3	
		Y	324.22	—	0.0006～0.0096	6.3	0.0	
高纯氧化钬	载体分馏 AES	Co	240.7	测定下限 1	0.0001～0.01	7.8	−1	6
		V	241.5	3	0.0003～0.01	7.4	−4	
		Fe	248.8	5	0.0005～0.01	10.0	13	
		Sb	259.8	5	0.0005～0.01	9.8	−2	
		Mg	277.6	3.4	0.00034～0.01	10.1	−6	
		Mn	280.1	1	0.0001～0.01	10.5	5	
		Pb	280.2	5	0.0005～0.01	9.0	4	
		Sn	283.9	1	0.0001～0.01	8.8	3	
		Cr	302.1	3	0.0003～0.01	6.7	−4	
		Bi	306.7	3	0.0003～0.01	8.5	−3	
		Al	308.2	10	0.001～0.1	5.4	−5	
		Ni	310.1	3	0.0003～0.01	7.8	−9	
		Cd	326.1	5	0.0005～0.01	11.0	−15	
高纯氧化钬	ICP-AES	Tb	370.392	9.7	0.0030～0.30	—		7
		Dy	394.470	4.6	0.0020～0.20	—		
		Er	369.264	4.8	0.0020～0.20	—	−9.0～30	
		Tm	376.133	3.3	0.0020～0.20	—		
		Y	371.030	0.82	0.00030～0.030	—		
高纯氧化钪	ICP-AES	La	333.749	1.48	以氧化物计 0.00020～0.020	—	—	8
		Ce	422.575	7.01	0.0010～0.10	—	—	
		Pr	422.298	3.40	0.00040～0.040	—	—	
		Nd	410.946	2.32	0.00040～0.040	—	—	
		Sm	443.434	8.75	0.0010～0.10	—	—	
		Eu	393.051	0.32	0.00010～0.010	—	—	
		Gd	342.246	1.91	0.00020～0.020	—	—	
		Tb	350.917	1.28	0.00040～0.040	—	—	
		Dy	400.048	0.31	0.00010～0.010	—	—	
		Ho	345.600	2.13	0.00020～0.020	—	—	
		Er	323.059	0.57	0.00010～0.010	—	—	
		Tm	342.510	1.69	0.00020～0.020	—	—	
		Yb	328.937	0.11	0.00040～0.040	—	—	
		Lu	347.249	2.34	0.00040～0.0040	—	—	
		Y	324.224	0.10	0.00010～0.010	—	—	
高纯氧化镨	ICP-AES	La	474.027	0.0009	—	4.8	−3～10	9
		Ce	456.055	0.0016	—	7.8	−8～10	
		Nd	444.638	0.0005	—	2.3	−2～10	
		Sm	446.734	0.0028	—	1.7	−4～10	
		Y	332.785	0.0005	—	8.3	−4～9	
高纯氧化镝	AES	Ni	232.003	测定下限 3	0.0003～0.01	4.8	−3	10
		Co	240.725	1	0.0001～0.01	4.6	−1	
		V	241.533	3	0.0003～0.03	4.8	−1	
		Fe	248.419	6	0.0006～0.01	5.9	−7	
		Al	257.510	3	0.0003～0.03	10.8	3	
		Sb	259.808	3	0.0003～0.01	7.2	6	
		Mn	260.569	1	0.0001～0.01	4.9	−3	
		Pb	266.317	5	0.0005～0.03	5.4	4	
		Cr	267.716	3	0.0003～0.01	5.7	4	
		Mg	277.668	3	0.0003～0.01	4.5	6	
		Sn	283.999	1	0.0001～0.005	4.9	−4	
高纯氧化铕	直流电弧 AES	La	408.6	—	0.0005～0.03	10	4	11
		Ce	412.7	—	0.005～0.3	11	4	
		Pr	422.2	—	0.005～0.3	9	1	
		Nd	410.9	—	0.01～0.3	11	−12	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
高纯氧化镧	直流电弧	Sm	388.5	—	0.001～0.03	19	19	11
		Eu	397.1	—	0.0005～0.03	14	1	
		Gd	310.0	—	0.005～0.3	11	0	
		Tb	332.4	—	0.01～0.3	13	7	
		Ho	345.6	—	0.005～0.3	12	−7	
		Er	369.2	—	0.002～0.03	15	−12	
		Tm	379.5	—	0.001～0.03	13	3	
		Yb	398.7	—	0.001～0.03	17	−12	
		Lu	307.7	—	0.005～0.3	7	1	
		Y	377.4	—	0.001～0.03	12	−2	
高纯氧化镧	ICP-AES	Al	308.2	0.0031	—	2.3	−16	12
		Cr	284.3	0.0033	—	5.0	−12	
		Cu	324.8	0.0050	—	4.9	−11	
		Fe	302.1	0.0054	—	3.7	−1	
		V	290.5	0.0013	—	2.4	−13	
高纯氧化镧	ICP-AES	Eu	—	0.0032	—	2.3	−10	13
		Gd	—	0.0075	—	3.4	−12	
		Tb	—	0.0054	—	5.6	4	
		Dy	—	0.0015	—	1.7	4	
		Ho	—	0.0026	—	4.2	8	
		Er	—	0.0021	—	2.5	−20	
		Tm	—	0.0040	—	4.5	−4	
		Yb	—	0.00034	—	2.4	−4	
		Lu	—	0.0093	—	4.5	8	
		Y	—	0.00047	—	2.6	−8	
光学级氧化镧	ICP-AES	Ce	404.076	3	—	5.2～7.9	−5～1	14
		Pr	417.939	1	—	5.7～8.8	−7～9	
		Nd	415.608	1	—	2.9～4.9	1～2	
		Sm	367.084	1	—	4.3～9.8	−1～1	
高纯氧化钐	ICP-AES	La	408.671	测定下限 0.01%～0.05%	—	6.40	5	15
		Ce	413.380		—	3.10	2	
		Pr	440.884		—	8.00	8	
		Nd	430.357		—	1.07	2	
		Eu	272.778		—	2.31	−5	
		Gd	376.841		—	5.98	7	
		Tb	332.440		—	4.36	−4	
		Dy	394.469		—	3.20	3	
		Ho	381.073		—	0.46	−1	
		Er	337.275		—	1.46	5	
		Tm	384.802		—	7.42	−8	
		Yb	328.937		—	0.98	5	
		Lu	261.542		—	0.54	−1	
		Y	371.029			2.31	5	
氧化镧	ICP-AES	Y	360.1	0.0006	3个数量级以上		—	16
氧化铕	ICP-AES	La	408.671	测定下限 4.5	—	5.6	—	17
		Ce	404.076	5～10	—	—	—	
		Pr	422.533	5～10	—	9.5	—	
		Nd	401.225	4.5	—	5.6	—	
		Sm	359.260	4.5	—	5.9	—	
		Gd	376.841	4.5	—	5.8	—	
		Tb	367.635	5～10	—	16	—	
		Dy	338.503	4.5	—	5.9	—	
		Ho	345.600	—	—	2.9	—	
		Er	337.275	4.5	—	4.9	—	
		Tm	313.126	1～2	—	2.9	—	
		Yb	328.937	1～2	—	2.7	—	
		Lu	261.542	1～2	—	3.0	—	
		Y	324.228	1～2	—	3.0	—	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
高纯氧化铕	ICP-AES	La_2O_3	408.6	—	—	6.2	2	18
		Ce_2O_3	413.3	—	—	8.7	−6	
		Pr_6O_{11}	417.9	—	—	12.7	0	
		Nd_2O_3	415.6	—	—	10.2	−10	
		Sm_2O_3	359.2	—	—	5.1	−16	
		Gd_2O_3	342.2	—	—	9.4	2	
		Tb	350.9	—	—	7.5	−16	
		Dy	353.1	—	—	8.1	−14	
		Ho	345.6	—	—	5.3	−10	
		Er	349.9	—	—	13.1	6	
		Tm	329.1	—	—	7.3	−8	
		Yb	328.9	—	—	9.2	12	
		Lu	350.7	—	—	12.3	−4	
		Y	324.2	—	—	12.9	−10	
UF_4	ICP-AES	Li	670.7	0.001	—	4.1	−13	19
		Cd	228.8	0.0015	—	6.0	5	
		Ca	396.8	0.001	—	0.19	−1	
		Al	308.2	0.026	—	2.7	0	
		Fe	259.9	0.013	—	0.94	4	
		Mn	257.6	0.006	—	1.4	−13	
		Ni	231.6	0.006	—	5.6	−1	
		Mg	279.5	0.001	—	0.51	−25	
		Cr	205.5	0.006	—	1.7	−27	
		Be	234.8	0.001	—	0.68	−11	
		Sn	189.9	0.007	—	4.0	−8	
		Zn	213.8	0.003	—	1.4	−17	
		V	290.8	0.003	—	0.91	−12	
		Mo	202.0	0.004	—	3.9	−14	
		W	207.9	0.010	—	3.4	4	
铀	ICP-AES	Dy	353.1	0.006	(0.02～10)μg·ml⁻¹	0.3～9.0	−12～−1	20
		Eu	420.5	0.006	(0.02～10)μg·ml⁻¹	0.4～2.5	−12～0	
		Gd	379.6	0.015	(0.05～10)μg·ml⁻¹	0.8～13.3	−6.5～24	
		Sm	442.4	0.035	(0.10～10)μg·ml⁻¹	1.1～11.5	−15～4	
		Th	401.9	0.063	(0.20～10)μg·ml⁻¹	1.3～2.6	−7～10	
混合稀土	ICP-AES	La	408.671	0.0008	—	1.1	3	21
		Ce	413.380	0.0040	—	1.01	2	
		Pr	422.535	0.0020	—	0.97	6	
		Nd	401.225	0.0019	—	1.3	6	
		Sm	428.079	0.0005	—	0.6	2	
		Eu	390.710	0.0005	—	0.77	0	
		Gd	335.048	0.0020	—	0.95	0	
		Tb	350.917	0.0017	—	1.1	−2	
		Dy	353.171	0.0005	—	0.55	5	
		Ho	339.898	0.0023	—	0.47	0	
		Er	337.271	0.0010	—	0.54	−13	
		Tm	342.508	0.0009	—	0.83	1	
		Yb	328.937	0.0003	—	1.2	0	
		Lu	261.542	0.0004	—	1.3	0	
		Y	371.030	0.00068	—	—	−3.5	
混合稀土氧化物	AES	Y	298.42	—	1.5～70.0	—	−9.4	22
		Gd	301.01	—	0.5～32.0	—	1.2	
		Yb	303.11	—	0.5～30.0	—	0.0	
		Er	313.27	—	0.5～10.0	—	2.0	
		Dy	313.53	—	0.5～30.0	—	−6.7	
		Tb	332.44	—	0.5～30.0	—	−5.7	
		Tm	325.80	—	0.5～7.0	—	−7.0	
		La	326.56	—	0.5～30.0	—	−1.0	
		Lu	331.21	—	0.5～4.0	—	−7.7	
		Sm	330.70	—	0.5～20.0	—	−4.7	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g^{-1})	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
混合稀土氧化物	AES	Ho	341.04	—	0.5～8.0	—	−2.5	22
		Nd	313.36	—	7.0～30.0	—	4.4	
		Ce	446.02	—	0.5～8.0	—	0.0	
		Pr	440.84	—	0.5～6.5	—	−5.0	
混合稀土	ICP-AES	La	379.178	0.0012	—	0.55	−1.1	23
		Ce	413.765	0.00114	—	0.65	−2.0	
		Pr	405.654	0.0069	—	2.3	−0.7	
		Nd	401.225	0.0019	—	0.79	−2.4	
		Sm	428.079	0.0005	—	0.18	−1.2	
		Eu	412.970	0.0004	—	1.1	−3.8	
		Gd	342.246	0.0017	—	0.19	−2.1	
		Tb	356.174	0.0051	—	0.33	−3.0	
		Dy	353.171	0.0005	—	1.0	0.5	
		Ho	341.645	0.0030	—	0.64	−1.8	
荧光级氧化钇	ICP-AES	La	408.672	0.71	—	4.5	−6.7	24
		Ce	413.765	1.2	—	6.7	−13.3	
		Pr	417.942	2.1	—	9.8	13.3	
		Nd	401.225	0.80	—	5.2	7.7	
		Sm	356.828	1.7	—	7.4	−6.7	
		Eu	443.970	0.48	—	6.2	−16.7	
		Gd	335.048	0.90	—	4.1	13.3	
		Tb	387.419	1.6	—	5.2	−10.0	
		Dy	400.048	0.91	—	3.2	0.0	
		Ho	426.426	0.94	—	5.4	−13.3	
		Er	337.276	0.67	—	5.8	6.7	
		Tm	342.508	0.73	—	7.5	20.0	
		Yb	369.420	0.36	—	4.4	−3.3	
		Lu	261.542	0.31	—	5.2	−1.7	
高纯氧化钇	ICP-AES	La	379.080	0.042	—	—	−6.7	25
		Ce	418.660	0.23	—	—	−5.9	
		Sm	359.260	0.044	—	—	−8.2	
		Al	308.216	0.047	—	—	−1.9	
		Cu	324.754	0.28	—	—	−0.7	
		Pb	220.353	0.022	—	—	−1.5	
核用氢氧化锂	ICP-AES	B	249.6	2.5	—	8	−5	26
		Ca	317.9	6.0	—	10	9	
		Cd	228.8	0.7	—	9	3	
		Cr	205.5	1.7	—	5	−1	
		Fe	259.9	2.2	—	4	5	
		Ni	231.6	1.9	—	7	2	
		Pb	220.3	7.0	—	6	6	
		Zn	213.8	0.3	—	5	−2	
氯化钠等	ICP-AES	Al	396.15	0.0004	—	3～6	0.4	27
磷化合物	ICP-AES	P	177.499	0.5	≤200μg·ml^{-1}	2.01	—	28
二氧化锆	AES	Fe	285.2	5	0.001～0.1	6.40	−7.50	29
		Ca	318.2	3	0.005～0.1	5.60	8.33	
		Ti	319.2	5	0.001～0.1	6.40	−3.33	
		Hf	277.3	3.5	0.0005～0.1	5.00	−6.67	
		Mg	280.2	5	0.001～0.1	7.30	9.30	
		Si	245.2	3	0.0005～0.1	6.70	−10.00	
		Al	306.0	3	0.0005～0.1	8.90	10.00	
碳酸氢铵	ICP-AES	Mg	202.582	1.6	—	6.3	6.8	30
		Al	226.346	2.3	—	4.6	−5.6	
		Ni	231.604	0.8	—	3.4	−3.4	
		Fe	239.562	1.7	—	7.3	−3.0	
		Si	251.611	2.6	—	5.0	−3.6	
		Mn	259.373	1.5	—	5.9	19.3	
		Ca	317.933	1.4	—	4.7	12.4	
		Pb	405.783	2.6	—	3.5	−3.7	
碳化硅	ICP-AES	Al	396.15	0.5～1.8	—	0.74	0.4	31
		Ca	393.37	0.03～0.06	—	2.32	2.4	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
氮化硅	ICP-AES	C	193.091	180	≤2.5	<7	—	32
钨酸钠	ICP-AES	Ca	—	0.002	—	2.4	−7～−3	33
		Mg	—	0.001	—	1.1	−11～−9	
硫酸锌	ICP-AES	Cd	228.802	12.7	—	—	—	34
		Mn	257.610	0.46	—	—	−10.7～4.2	
		Fe	259.940	1.8	—	—	−6.1～6.8	
		Pb	261.418	16	—	—	—	
		Ni	300.249	11.8	—	—	—	
		Cu	324.754	1.7	—	—	−2.5～11.1	
石墨	ICP-AES	Dy	346.5	0.2μg	—	3	−4	35
		Eu	420.5	0.01μg	—	3	18	
		Gd	379.6	0.02μg	—	3	−12	
		Sm	442.4	0.1μg	—	4	25	
三甲基镓	ICP-AES	Ga	294.364	—	—	—	—	36
		Al	396.152	2	<0.0002～4.8	21	—	
		Cu	324.754	0.6	0.0001～0.0005	20	—	
		Mg	279.553	0.08	0.00005～0.0003	15	—	
		Fe	259.940	0.6	<0.0001～0.0018	—	—	
		Si	251.611	—	0.0010～0.0050	13	—	
植酸	ICP-AES	Ca	317.93	—	—	0.9～2.2	−0.8～4.0	37
有机化合物	ICP-AES	P	213.618	0.04	—	0.6～0.8	−5.10～2.05	38
结晶硅	ICP-AES	Fe	238.2	2	0～1.0	—	—	39
		Al	396.15	4	0～1.0	—	—	
		Ca	393.3	1	0～1.0	—	—	
硝酸钴	ICP-AES	Fe	259.94	5.0	0.005～0.12	1.5～2.4	0～3	39
		Mn	249.91	5.0	0.005～0.12	0～1.8	0～2	
		Ni	231.60	50.0	0.05～1.50	1.6～4.0	0～2	
		Ca	393.41	3.0	0.003～0.03	0～5.5	0～7	
		Na	589.60	3.0	0.003～0.03	1.9～8.8	0～3	
磷酸	ICP-AES	Al_2O_3	396.15	0.90	0.0009～33.07	0.64	−4.4	39
		Fe_2O_3	238.20	0.14	0.00014～7.15	1.68	−0.7	
		CaO	393.37	0.014	0.000014～0.14	2.17	−1.7	
		MgO	280.27	0.014	0.000016～8.29	0.53	−0.1	
铝和铝盐	ICP-AES	B	249.6	0.0018	0.00018～1.0	2.9	−18～−3	39
		Cd	228.8	0.0006	0.00006～0.50	1.2	14～0	
		Cu	324.7	0.0016	0.00016～1.0	0.94	−11～−1	
		Fe	259.9	0.002	0.0002～1.0	2.4	−14～−1	
		Mg	279.5	0.0004	0.00004～0.5	1.1	−14～−3	
		Mn	257.6	0.0016	0.00016～1.0	1.1	−14～−2	
		Ni	231.6	0.0164	0.00164～1.50	3.0	−11～−3	
		Si	288.1	0.0066	0.00066～1.0	2.2	−15～−3	
		Ti	334.9	0.0008	0.00008～0.50	3.4	−15～−3	
		V	292.4	0.0084	0.00084～1.0	3.3	−14～−3	
		Zn	213.8	0.001	0.0001～0.80	1.3	−12～−2	
氟化钠	ICP-AES	Al	396.15	0.0004	0.0005～0.50	4.0		
氟化钙	ICP-AES	Al	237.34	0.0040	0.001～0.50	6.0	−0.6～1.8	39
氟氢化铵	ICP-AES	Al	396.15	0.0001	0.0001～0.50	3.0		
铅及铅盐	ICP-AES	Cu	324.7	0.0002	0.00005～0.01	0.92	2.2	39
		Ag	328.1	0.0007	0.00001～0.01	0.79	−27.2	
		Bi	306.8	0.0091	0.0001～0.01	0.44	7.1	
		As	193.7	0.005	0.00005～0.01	1.47	−22	
		Sb	217.6	0.0046	0.00005～0.01	1.02	−25	
		Zn	202.5	0.0007	0.00001～0.01	1.99	−4.8	
		Sn	189.9	0.0004	0.00005～0.01	1.62	−4.1	
催化剂	ICP-AES	Ni	231.60	0.10	(1.0～500)μg·L⁻¹	1.9	−0.6	39
		La	379.48	0.10	(1.0～200)μg·L⁻¹	2.5	−2.9	
		Mg	279.55	0.005	(0.05～300)μg·L⁻¹	2.5	−8.7	
食盐	ICP-AES	I	206.13	0.8	0.8～500mg·L⁻¹	2.6	−3.9	39

续表

样品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g \cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
聚丙烯	ICP-AES	Ti	365.8	0.04	$(0\sim60)\mu g \cdot g^{-1}$	3.08~4.65	—	40
		Al	309.3	0.16	$(0\sim60)\mu g \cdot g^{-1}$	2.75~6.34	—	
聚酯切片	ICP-AES	Ti	323.452	0.008498	—	1.33	−3.33~0.6	41
		Fe	238.204	0.005765	—	3.83	−6.50~−2.75	
汽油和润滑油	火焰AES	K	—	—	$(0\sim16)mg \cdot L^{-1}$	1.1~2.9	−0.7~3.0	42
原油等	ICP-AES	S	181.9	—	$(10\sim100)\mu g \cdot ml^{-1}$	1~3	0.06	43
重质油	AES	Na	589.0	—	—	0.3~1.3	−0.6~0.4	44
航空润滑油	AES	Ag	328.1	0.0020	—	3.2	3	45
		Cd	228.8	0.00038	—	1.03	0	
		Cu	324.7	0.0013	—	0.93	16	
		Fe	372.0	0.061	—	2.4	4	
		Mg	279.6	0.0022	—	3.0	9	
		Zn	213.9	0.0043	—	2.3	0	
航空润滑油	ICP-AES	Fe	259.940	0.024	—	4.3	−2.0~1.5	46
		Cu	324.754	0.007	—	2.8	2.0~2.5	
		Cr	267.716	0.011	—	1.4	−13.0~−12.0	
		Ti	334.941	0.008	—	5.8	−1.5~0.5	
铋系超导体	ICP-AES	Bi	306.77	0.090	—	—	−0.7~0.8	47
		Sr	421.55	0.005	—	—	−2.1~−0.7	
		Ca	422.67	0.007	—	—	−0.4~−2.1	
		Cu	327.40	0.005	—	—	0.6~0.8	
		Pb	405.78	0.095	—	—	−0.9~−0.8	
		Y	371.04	0.003	—	—	—	
		Sb	206.84	0.030	—	—	−0.2	
半导体材料	ICP-AES	Ge	265.18	0.0004	$(0.001\sim10)\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−10~20	48
半导体材料	ICP-AES	U	385.958	0.05ng	—	—	−10~−9	49
		Th	401.913	0.02ng	—	—	−8~−6	
钨酸钇钾激光晶体	ICP-AES	Er	404.835	0.5	$(50\sim160)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.90	−11.4~5.3	50
		Nd	406.109	10	$(4\sim15)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.60	−3.5~5.8	
钒酸钇晶体	ICP-AES	Er	369.26	—	$(5.0\sim30)\mu g \cdot ml^{-1}$	2.1	−2~4	51
		Eu	397.20	—	$(1.5\sim8.0)\mu g \cdot ml^{-1}$	2.6	−4~5	
钨酸镧激光晶体	ICP-AES	Nd	401.225	—	$(4\sim6)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.62	−6~4	52
硼酸铝钇钕激光晶体	ICP-AES	Nd	401.225	0.4	$(4\sim15)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.42	−4~5	53
陶瓷材料	ICP-AES	Cd	228.802	0.0006	—	1.9~26	—	54
陶瓷色料	火焰AES	Nd	492.5	0.17	—	—	−2.7~6	55

本表参考文献：

1 费 浩，唐邦福．核动力工程，1994；15(4)：357
2 綦文娣，袁 甫．分析化学，1992；20(7)：787
3 余淑清，付晓春．分析化学，1984；12(12)：1081
4 李荣辉，郭冬发，燕秀琴等．光谱学与光谱分析，1993；13(2)：59
5 王淑英，刘 杰，陈新梅．分析化学，1992；20(1)：1273
6 李全福．理化检验（化学分册），1991；27(5)：277
7 袁 甫，綦文娣，郝志平．分析化学，1993；21(8)：918
8 袁 甫，綦文娣．分析化学，1991；19(10)：1158
9 张春昕．光谱学与光谱分析，1990；10(4)：54
10 李全福．光谱学与光谱分析，1988；8(5)：30
11 李全福，周朝雁．分析试验室，1991；10(2)：50
12 吉红念，刘 炼，廖振环等．分析科学学报，1996；12(3)：198
13 陈建国，江祖成，孔令英．中国稀土学报，1992；10(1)：89
14 刘虎生．理化检验（化学分册），1992；28(5)：298
15 张文东，刘贵标，夏禹漠．理化检验（化学分册）．1994；30(2)：91
16 黄敏，江祖成，曾云鹗．中国稀土学报．1992；(10)(2)：163
17 刘文华，龚建华等．分析试验室，1995；14(1)：53
18 李金英，高炳华，关景素．岩矿测试，1994；13(3)：175
19 冯凤娣，方名均，钱军等．理化检验（化学分册）．1989；25(3)：142
20 Seshegiri T K，BabuY，Kumar M L T et al．Talanta，1984；31(10A)：773
21 廖振环，陈 浩，江祖成．分析仪器，1990；(3)：36
22 刘清平，刘纯凡．江西冶金，1992；12(1)：48
23 陈 浩，江祖成，廖振环等．理化检验（化学分册）．1990；26(5)：268
24 袁 甫，凌 诚，綦文娣等．光谱学与光谱分析，1994；14(6)：71
25 杨金夫，朴哲秀，曾宪津．光谱学与光谱分析，1992；12(1)：60
26 刘虎生．冶金分析，1992；12(3)：60
27 罗汉金．理化检验（化学分册），1990；25(6)：373
28 Manzoori J L，Miyazaki A，Tao H．Analyst，1990；115(8)：1055
29 李慧芝，白玉兴，张跃淑．光谱学与光谱分析，1994；

14(2)：79

30 卢宏．湖南冶金，1995；(1)：57

31 山口仁志，原口紘炁，大河内春乃．分析化学（日），1991；40(6)：271

32 Varga I，Zaray G，Szepvolgyi J et al．Mikrochim Acta，1989；Ⅱ(3/6)：381

33 付穗珠，陈元清，张济南．分析测试通报，1991；10(1)：56

34 陈新坤，刘振祥，壮凌．分析试验室，1986；5(5)：31

35 Bangia T R，Dhawale B A，Adya V C et al．Fresenius' Z Anal Chem，1988；332(7)：802

36 Bertenyi I，Barnes R M．Anal Chem，1986；58(8)：1734

37 刘守廷．理化检验（化学分册），1994；30(5)：302

38 Siroki M，Vujicic G，Milun V et al．Anal Chim Acta，1987；192(2)：175

39 光谱实验室．《光电光谱分析》之3，1993；10(增刊)：245～342

40 Oktavec D，Lehotay J．At Spectrosc，1993；14(4)：103

41 刘　翔，张国平．光谱实验室．1994；11(3)：44

42 Roscoe C E，Miles R，Taylor C G．Anal Chim Acta，1990；234(2)：439

43 Murillo M，Carrion N et al．J Anal At Spectrom，1993；8(3)：493

44 刘梅英．光谱学与光谱分析，1994；14(2)：87

45 张寒琦，张金生，王艾荣等．分析仪器，1992；(1)：23

46 董式国，胡明芬，雷玉叶．四川大学学报（自然科学版），1993；30(3)：421

47 赵玉珍．分析试验室，1993；12(6)：67

48 Nakata F，Sunahara H，Fujimoto H et al．J Anal At Spectrom，1988；3(4)：579

49 岡田章，平手直之．分析化学（日），1988；37(1)：T205

50 庄运河，涂朝阳．光谱实验室，1995；12(2)：36

51 吴承美，林云山．光谱实验室，1995；12(2)：21

52 庄运河．光谱实验室，1993；10(3)：1

53 庄运河．分析测试学报，1993；12(3)：70

54 内川浩，古田力久，三原康央．分析化学（日），1983；32(11)：673

55 Mauri A R，Domenech M T，De la Guardia M et al．At Spectrosc，1990；11(3)：90

表 4-16　AES 法在环保、医药卫生及食品等领域的应用

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
井水、河水、池塘水、地下水	ICP-AES	Be	313.04	0.0002	—		−6.0～5.0	1
		Ti	334.94	0.0002	—		−3.0～7.0	
		Sn	189.98	0.0008	—		2.0～5.0	
		Cr	267.71	0.0001	—		0～8.0	
		Cu	324.75	0.0003	—		4.0	
		Cd	226.50	0.0002	—		2.0～4.0	
		Zn	213.85	0.001	—		−4.0～16.0	
		Co	228.61	0.0002	—	≤20	0～4.0	
		Ni	231.64	0.0002	—		−4.0～4.0	
		V	311.07	0.0001	—		0～4.0	
		Pb	220.35	0.002	—		−6.0～12	
		Mn	257.61	0.0002	—		−2.0～20	
		Fe	259.94	—	—		—	
		Ca	422.67	—	—		—	
		Mg	279.55	—	—		—	
		Al	308.21	—	—		—	
海水、天然水	离子交换富集-ICP-AES	Co	237.862	0.0002	(0.03～30) μg·ml⁻¹	3.3～4.0	−15～−10	1
		Cu	324.754	0.0002	(0.03～30) μg·ml⁻¹	3.3～4.2	−18～−7	
		Ni	231.604	0.0002	(0.03～30) μg·ml⁻¹	2.0	−12～−3	
		Fe	259.94	0.0002	(0.03～30) μg·ml⁻¹	1.0	−12	
		Zn	206.191	0.0002	(0.03～30) μg·ml⁻¹	3.0	−17	
		Pb	220.353	0.002	(0.3～30) μg·ml⁻¹	8.0	2	
地面水、天然水、生活污水、部分工业废水	ICP-AES	Na	330.255	0.7	(50～200) μg·ml⁻¹	1.2	−1.8	1
		Ca	393.416	0.0007	(5～100) μg·ml⁻¹	1.6	1.8	
		Mg	279.548	0.007	(5～50) μg·ml⁻¹	2.3	−4.2	
		Fe	259.940	0.01	(0.1～10) μg·ml⁻¹	2.7	2.0	
		Ba	233.527	0.03	(0.1～10) μg·ml⁻¹	1.9	−1.6	
		Cr	205.570	0.035	(0.05～1.0) μg·ml⁻¹	3.0	−0.7	
		Mn	257.583	0.0017	(0.1～10) μg·ml⁻¹	1.2	1.0	
		As	228.779	0.05	(0.05～1.0) μg·ml⁻¹	13.0	0.5	
地面水、天然水、生活污水、工业废水	氢化物发生-ICP-AES	As	189.04	0.0007	(0.01～0.1) μg·ml⁻¹	1.6	−1～2	1
地面水、天然水、生活污水、工业废水	溶剂萃取-ICP-AES	Pb	220.352	0.014	(0.01～100) μg·L⁻¹	4.0	−15～−5	1
		Cu	342.780	0.0034	(0.05～500) μg·L⁻¹	5.0	−14～3	
		Ag	328.083	0.0030	(0.01～100) μg·L⁻¹	5.0	−24～2	
		Zn	213.861	0.042	(0.01～100) μg·L⁻¹	3.0	−18～−4	
		Cd	228.823	0.0090	(0.01～100) μg·L⁻¹	2.0	−18～−1	

续表

样品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/($\mu g\cdot g^{-1}$)	测量范围/%	*RSD*/%	相对误差/%	文献
地面水、天然水、生活污水、工业废水	溶剂萃取-ICP-AES	Se	196.098	0.053	(0.002~0.05) $\mu g\cdot ml^{-1}$	10.0	−2~17	1
工业污水	ICP-AES	Cr	267.716	0.0039	(0.1~100)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.32	−11~3	
		Cu	324.75	0.0017	(0.05~25)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.57	−0.5~2	1
		Pb	220.353	0.0124	(0.10~5.0)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.24	−7~2	
		Zn	213.856	0.0012	(0.50~100)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.30	−1~0	
		Cd	226.502	0.0011	(0.05~5.0)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.14	1~2.8	
		As	193.696	0.0167	(0.10~5.0)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.47	−1~8.6	
		Hg	184.96	0.0063	(0.06~5.0)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.34	2~5	
		S	182.04	0.0504	(0.50~500)$\mu g\cdot ml^{-1}$	0.67	13	
		P	178.287	0.067	(0.50~100)$\mu g\cdot ml^{-1}$	1.20	3~13	
海水	ICP-AES	S	180.73	0.7	(5.0~1000)$\mu g\cdot ml^{-1}$	3.3	−2	1
		B	249.77	0.05	(0.5~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	2.7	0	
		Mg	279.08	0.007	(0.5~2000)$\mu g\cdot ml^{-1}$	3.5	0	
		Ca	317.93	0.005	(0.5~1000)$\mu g\cdot ml^{-1}$	4.1	−2	
		Na	330.24	7	(20~10000)$\mu g\cdot ml^{-1}$	3.3	—	
		Sr	407.77	0.005	(0.5~50)$\mu g\cdot ml^{-1}$	2.4	—	
近岸海水	ICP-AES	Co	237.862	0.0002	(0.03~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	4.13	−12.5	1
		Cu	324.754	0.0002	(0.03~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	5.80	−12.5	
		Ni	231.604	0.0002	(0.03~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	4.67	−7.5	
		Fe	259.94	0.0002	(0.03~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	3.85	12	
		Zn	206.191	0.0002	(0.03~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	5.50	−17	
		Pb	220.353	0.002	(0.5~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	9.05	2	
饮用水	氢化物发生-ICP-AES	As	234.9	0.002	—	2	−10~4	2
水	ICP-AES	Fe(Ⅲ)	259.9	0.026	3个数量级	2.4	—	3
		Fe(Ⅱ)		0.031		3.0	—	
自来水	ICP-AES	F	333.75	0.0002	(0.01~1.0)$\mu g\cdot ml^{-1}$	3.0	−5~0	4
地下水	硫化氢发生-ICP-AES	S	180.731	0.0021	≤100$\mu g\cdot ml^{-1}$	—	—	5
自来水、污水	ICP-AES	Fe	259.9	0.003	(0.1~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	6.3	2	6
		Mn	260.5	0.003	(0.03~30)$\mu g\cdot ml^{-1}$	13.8	−2	
		Cr	283.5	0.001	(0.03~1)$\mu g\cdot ml^{-1}$	7.2	1	
		Cu	324.7	0.01	(0.03~3)$\mu g\cdot ml^{-1}$	8.2	−3	
水	氢化物发生-ICP-AES	Ge	265.12	0.000015	—	3.6~8.1	−30~17	7
湖水	FI-ICP-AES	Na	588.995	0.02	—	1.6	−5~−3	8
饮用水	ICP-AES	As	234.98	0.000002	—	2	−10~4	9
井水、江水、水库水	ICP-AES	Al	396.152	0.06	—			10
		B	249.773	0.03	—			
		Ba	413.066	0.10	—			
		Be	313.107	0.0005	—			
		Ca	317.933	0.02	—			
		Cd	228.802	0.50	—			
		Co	258.716	0.10	—			
		Cr	283.563	0.01	—			
		Cu	324.754	0.005	—	<18	−20~10	
		Fe	259.940	0.01	—			
		Mg	383.231	0.002	—			
		Mn	257.610	0.005	—			
		Mo	281.615	0.03	—			
		Ni	341.676	0.10	—			
		Pb	283.306	0.50	—			
		Sr	346.446	0.03	—			
		V	292.402	0.001	—			
		Zn	334.502	0.30	—			
水	Ar-MIP-AES He-MIP-AES	I	206.2	0.12 0.06	(0.2~200)$\mu g\cdot ml^{-1}$ (0.1~400)$\mu g\cdot ml^{-1}$	<5	— —	11
海水	ICP-AES	Mo	202.03	0.0007	—	1.8	−3.6~6.0	12

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g^{-1})	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
天然水	ICP-AES	La	379.5	0.0007	—	1.7	−10~10	13
自来水	ICP-AES	Ag	328.07	0.002	—	2.1	—	14
海水	ICP-AES	Pb	220.355	0.000006	(0.00004~0.00005) μg·ml^{-1}	4.5	—	15
天然水	ICP-AES	Ge	—	0.6 pg·ml^{-1}	(0.5~17) pg·ml^{-1}	—	−5~−3	16
饮用水	ICP-AES	Ag	328.068	0.01026	(20~26)μg·ml^{-1}	15.9	−7	17
		Ca	315.887	0.02	(0.2~86)μg·ml^{-1}	10.3	−3	
		Na	330.237	0.01	(0.2~168)μg·ml^{-1}	3.97	−2	
		Ba	455.400	0.00021	(20~166)μg·ml^{-1}	4.19	4	
		Cr	267.720	0.002	(20~24)μg·ml^{-1}	5.21	1	
		Al	308.220	0.00488	(20~86)μg·ml^{-1}	9.34	−1	
		Fe	259.940	0.00071	(20~767)μg·ml^{-1}	4.86	−2	
		Mg	279.080	0.01	(0.2~39)μg·ml^{-1}	4.69	0	
		Mn	257.610	0.00033	(20~386)μg·ml^{-1}	3.26	2	
		Sr	407.770	0.00015	(20~616)μg·ml^{-1}	3.0	1	
		Zn	213.860	0.00028	(20~250)μg·ml^{-1}	5.58	−1.1	
		Cu	324.750	0.00025	(20~563)μg·ml^{-1}	4.3	2	
		K	766.490	0.00001	(0.2~32)μg·ml^{-1}	4.79	−1	
		Ni	231.600	0.0012	(20~27)μg·ml^{-1}	4.24	1	
		Cd	226.500	0.00078	(20~22)μg·ml^{-1}	4.84	1	
		As	189.040	0.0031	(20~24)μg·ml^{-1}	6.41	1	
		Sb	217.590	0.00585	(20~27)μg·ml^{-1}	15.17	−8	
		Pb	220.350	0.0038	(20~123)μg·ml^{-1}	6.19	1	
海水	ICP-AES	Al	308.2	0.00018	—	6	−0.9	18
		Ti	334.9	0.000006	—	—	−3.6	
		V	292.4	0.00004	—	—	−4.1	
		Mn	257.6	0.000008	—	5	−28.0	
		Fe	238.2	0.00002	—	5	0.5	
		Co	228.6	0.00003	—	14	0.6	
		Ni	231.6	0.0001	—	5	1.6	
		Cu	324.7	0.00001	—	5	−5.5	
		Zn	213.8	0.00002	—	3	1.4	
		Y	371.0	0.000006	—	16	−9.6	
		Mo	202.0	0.00003	—	—	−11.2	
		Cd	228.8	0.00003	—	1	−3.8	
		Pb	220.3	0.00015	—	14	−14.4	
海水	ICP-AES	Ba	455.40	0.00005	—	1.2~1.7	—	19
天然水及废水	AES	Be	313.107	0.003	(0.0012~0.0017)μg·ml^{-1}	<20	—	20
废水	AES	Sb	—	0.00019	(0.001~1)μg·ml^{-1}	1.2~3.8	—	21
电镀废水	ICP-AES	Cd	326.1	0.0002	(0.005~4)μg·ml^{-1}	0.8	−10.3~−1.8	22
工业废水	ICP-AES	Cr	—	0.0025	—	0.76	−1~4	23
雪试样	ICP-AES	Na	589.592	0.020	—		—	24
		V	292.402	0.006	—		—	
		Fe	259.940	0.005	—		—	
		Al	308.216	0.125	—		—	
		Mg	279.078	0.040	—	−5~5	—	
		Cr	267.716	0.005	—		—	
		Zn	213.856	0.0007	—		—	
		Ca	317.933	0.010	—		—	
		Mn	257.610	0.0007	—		—	
		Ba	493.409	0.0008	—		—	
大气悬浮物	ICP-AES	Be	234.86	0.5	—			25
		B	249.77	5	—	9.7		
		Ga	294.36	<1	—	11		
		Cr	301.52	5	—	3.0		
		Ba	307.16	30	—	1.6		
		V	327.61	1	—	1.7		
		Yb	328.99	0.2	—	13.1	−8.8~12	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/($\mu g \cdot g^{-1}$)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
大气悬浮物	ICP-AES	Y	332.79	5	—	1.6		25
		Ni	305.08	1	—	2.1		
		Pb	283.31	<1	—	8.6		
		Ti	310.51	20	—	3.3		
		Nb	316.34	5	—	6.2		
		Zr	327.30	5	—	3.5		
城市大气飘尘	ICP-AES	Be	313.04	—	(0.001～0.5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	16	−10.0	26
		Cd	326.11	—	(0.3～20)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−10.0	
		Ni	341.48	—	—	9	−15.0	
		Pb	283.31	—	(0.03～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	3	10.0	
		Fe	303.74	—	(0.3～50)$\mu g \cdot ml^{-1}$	6	−3.0	
		Ti	323.45	—	(0.02～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	9	−9.0	
		Cu	327.40	—	(0.003～1)$\mu g \cdot ml^{-1}$	10	−10.0	
		Co	341.23	—	(0.1～5)$\mu g \cdot ml$	—	−5.0	
		Mn	259.37	—	(0.01～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	9	6.0	
		Zn	334.50	—	(0.3～10)$\mu g \cdot ml^{-1}$	9	−13.0	
		V	318.40	—	(0.03～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	9	10.0	
		Cr	283.56	—	(0.03～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	3	−5.0	
		Sn	284.00	—	(0.05～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	7	0	
生物材料	AES	Na	588.99	1.1pg	—	4.8	—	27
动物饲料	ICP-AES	Yb	328.937	0.00168	—	1.0～1.5	−1.7～3.4	28
生物材料(松叶、面粉、奶粉、牛肝)	ICP-AES	Mg	279.553	0.0004	—	0.7～1.7	—	29
		Ca	317.993	0.0040	—	1.8～6.2	—	
		K	766.490	0.0120	—	1.7～4.8	—	
		Na	589.592	0.0090	—	1.5～4.7	—	
		Fe	259.940	0.0018	—	1.1～9.8	—	
		Mn	257.610	0.0003	—	1.1～1.9		
		Cu	324.754	0.0010	—	0.9～13.2	—	
		Zn	213.856	0.0008	—	1.2～4.0	—	
		Sc	361.384	—	—	—	—	
生物材料样品	ICP-AES	Se	196.026	0.00009	—	<1.66	−9.6～1.3	30
生物样品	ICP-AES	Ge	228.802	0.0017	—	1.5～6.0	—	31
生物样品	ICP-AES	Li	—	0.04pg	—	8	−9～8	32
介形虫壳体	ICP-AES	Mg	279.55	0.0021	—	4.48	4.0	33
		Sr	407.77	0.0011	—	5.50	−1.0	
		Mn	257.61	0.0028	—	3.47	6.0	
		Fe	238.20	0.031	—	3.16	0	
		Ba	455.40	0.0037	—	4.22	—	
		Zn	213.86	0.0088	—	2.86	3.0	
		Ca	317.93	0.016	—	0.77	−2.0	
		Na	589.59	0.052	—	6.28	−10.0	
生物试样	ICP-AES	Mo	379.325	0.00043	(0.01～10)$\mu g \cdot ml^{-1}$	3.8	—	34
		Cu	324.754	0.0042	(0.02～30)$\mu g \cdot ml^{-1}$	4.2	—	
		Cd	361.051	0.141	(0.5～100)$\mu g \cdot ml^{-1}$	2.2	−4.0～4.0	
生物试样(猪肝)	ICP-AES 脉冲进样	Y	324.221	0.0015	—	4.4	−2	35
	ICP-AES 连续进样			0.021	—	3.1	2	
生物标准物质	ICP-AES	Cu	324.754	0.00087	—	2.9	—	36
人发	氢化物发生-ICP-AES	As	234.98	—	0.01～1.00$\mu g \cdot g^{-1}$	4.95	−2～12	37
	ICP-AES	Al	396.15	—	(5.91～19.6)$\mu g \cdot g^{-1}$		−3.6～3.2	38
		Ba	455.40	—	(0.27～2.13)$\mu g \cdot g^{-1}$		−2.7～0	
		Be	234.86	—	(0～0.047)$\mu g \cdot g^{-1}$		−5.0～−1.0	
		Ca	293.37	—	(326～820)$\mu g \cdot g^{-1}$		2.8～3.1	
		Co	228.62	—	(0～0.0471)$\mu g \cdot g^{-1}$		−6.0～−4.0	
		Cr	267.72	—	(0.514～2.29)$\mu g \cdot g^{-1}$		−2.0～6.0	
		Cu	324.75	—	(7.44～11.7)$\mu g \cdot g^{-1}$		−5.4～−2.2	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 $w/(\mu g\cdot g^{-1})$	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
人发	ICP-AES	Eu	381.97	—	—		−1.0～4.0	38
		Fe	259.94	—	$(6.99\sim38.1)\mu g\cdot g^{-1}$		−3.4～−1.4	
		La	398.85	—	$(0.293\sim1.25)\mu g\cdot g^{-1}$	0.64～15.6	0～1.0	
		Mg	279.55	—	$(19.0\sim53.4)\mu g\cdot g^{-1}$		−4.4～−1.5	
		Mn	257.61	—	$(0.232\sim2.61)\mu g\cdot g^{-1}$		−3.2～−1.0	
		Ni	231.65	—	$(0\sim4.80)\mu g\cdot g^{-1}$		−2.0～2.0	
		Pb	220.36	—	$(2.31\sim7.61)\mu g\cdot g^{-1}$		−9.0～−5.0	
		Sr	407.77	—	$(0.448\sim4.71)\mu g\cdot g^{-1}$		−5.7～−2.5	
		Ti	334.94	—	$(0.185\sim1.99)\mu g\cdot g^{-1}$		−2.0～−1.0	
		V	311.07	—	$(0\sim0.533)\mu g\cdot g^{-1}$		−8.0～−3.8	
		Y	371.03	—	$(0\sim0.158)\mu g\cdot g^{-1}$		−3.6～0	
		Zn	202.55	—	$(134\sim209)\mu g\cdot g^{-1}$		0.8～2.5	
		Zr	343.82	—	$(0\sim0.423)\mu g\cdot g^{-1}$		−8.0～−7.0	
学龄前儿童头发	ICP-AES	Ca	318.1	—	$(0.1\sim100)\mu g\cdot g^{-1}$	3.78	−20～0	39
		Mg	285.2	—	$(0.01\sim5)\mu g\cdot g^{-1}$	8.4	−17～5	
		Zn	334.5	—	$(0.5\sim100)\mu g\cdot g^{-1}$	2.2	−5～7	
		Cu	324.7	—	$(0.01\sim2)\mu g\cdot g^{-1}$	6.8	−13～0	
		Mn	257.6	—	$(0.01\sim2)\mu g\cdot g^{-1}$	2.5	−1～4	
		Cr	283.5	—	$(0.05\sim10)\mu g\cdot g^{-1}$	12.6	−18～4	
		Pb	283.3	—	$(0.5\sim100)\mu g\cdot g^{-1}$	—	−5～20	
		Fe	259.6	—	$(0.05\sim10)\mu g\cdot g^{-1}$	8.2	0～10	
		Sr	346.4	—	$(0.1\sim10)\mu g\cdot g^{-1}$	3.4	−4～7	
		Ba	233.5	—	$(0.2\sim100)\mu g\cdot g^{-1}$	—	−17～10	
		V	311.0	—	$(0.02\sim2)\mu g\cdot g^{-1}$	—	−5～0	
		Ni	341.4	—	$(0.05\sim20)\mu g\cdot g^{-1}$	—	−2～0	
		Co	345.3	—	$(0.2\sim20)\mu g\cdot g^{-1}$	—	−2～1	
		B	249.8	—	$(0.05\sim10)\mu g\cdot g^{-1}$	23.5	1～4	
人发、血液、唾液、牙石	ICP-AES	Al	237.3	0.038	—	1.0	−7～5	40
		Fe	271.4	0.044	—	2.3	−9～3	
		Ca	315.6	0.02	—	0.29	−8～6	
		Mg	279.0	0.039	—	0.80	−8～4	
		Ba	493.4	0.00075	—	0.30	−1～4	
		Co	228.6	0.0044	—	11.0	−5～5	
		Cr	205.5	0.0058	—	7.9	−9～5	
		Cu	324.7	0.006	—	0.5	−5～5	
		Mn	257.6	0.0064	—	2.4	−6～3	
		Ni	231.6	0.011	—	7.6	−3～2	
		P	224.9	0.120	—	0.80	−7～−4	
		Pb	220.3	0.023	—	9.5	−6～4	
		Sr	407.7	0.00024	—	0.5	−7～2	
		Zn	213.8	0.0012	—	0.2	−5～2	
		V	242.4	0.002	—	0.5	−4～−1	
		B	249.7	0.004	—	0.4	−9～4	
		Cd	228.8	0.002	—	9.5	−8～6	
		Ti	334.941	0.002	—	—	−8～6	
		Mo	202.030	0.005	—	—	−6～−2	
人体血清	ICP-AES	Al	396.1	0.05396	—	—	−2.0	41
		Be	313.1	0.00180	—	—	−16.0	
		Cu	327.4	0.19062	—	—	−1.0	
		Mn	260.5	0.00549	—	—	10.0	
		Mo	281.6	0.0959	—	—	5.0	
		V	292.4	0.01528	—	—	9.0	
人尿	ICP-AES	Cd	214.438	0.0056	—	5.3	−3.0	42
		Pb	220.353	0.0074	—	6.1	−12.6	
		Ni	232.003	0.0045	—	6.2	−36.0	
		Mn	257.610	0.0037	—	4.1	−18.6	
		Cu	324.754	0.0090	—	6.1	−5.5	
尿液	ICP-AES	B	249.7	0.0040	—	3.2	−1.4	43
		Be	313.0	0.0013	—	5.6	−3.8	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/($\mu g \cdot g^{-1}$)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
尿液	ICP-AES	Ca	315.8	0.0200	—	3.0	−0.4	43
		Cu	324.7	0.0060	—	8.5	2.0	
		Mg	279.0	0.0390	—	2.3	1.0	
		Mo	202.0	0.0044	—	10.0	−1.9	
		P	224.9	0.12	—	2.9	−1.8	
		Sr	407.7	0.0002	—	4.0	3.0	
		Zn	213.8	0.0012	—	3.2	−1.4	
人体体液和细胞组织	ICP-AES	Li	670.9	0.00004	$(0\sim0.025)$ $ng \cdot g^{-1}$	1.5	$-4.8\sim5.5$	44
人大腿骨	ICP-AES	B	249.678	2.0	—	26	—	45
		Ca	315.887	2.0	—	2.5	—	
		Fe	259.940	0.5	—	9.2	—	
		K	766.491	15	—	4.4	—	
		Mg	279.079	5.0	—	2.5	—	
		Na	588.995	2.0	—	3.5	—	
		P	178.287	10	—	1.8	—	
		Zn	213.856	0.5	—	2.5	—	
人肺	ICP-AES	Al	396.2	0.020	$(1.36\sim14.40)\mu g \cdot g^{-1}$	5.2	1.0	46
		Cd	228.8	0.015	$(0.02\sim0.21)\mu g \cdot g^{-1}$	5.8	−4.0	
		Cr	205.6	0.025	$(0.026\sim0.20)\mu g \cdot g^{-1}$	6.5	−3.0	
		Cu	324.7	0.040	$(0.46\sim1.80)\mu g \cdot g^{-1}$	6.3	1.0	
		Mg	279.5	0.010	$(8.70\sim150.00)\mu g \cdot g^{-1}$	2.8	−2.6	
		Mn	257.4	0.010	$(0.05\sim0.20)\mu g \cdot g^{-1}$	2.0	−7.0	
		V	292.4	0.010	$(0.01\sim0.09)\mu g \cdot g^{-1}$	10.0	−18	
		Zn	213.9	0.030	$(4.00\sim13.28)\mu g \cdot g^{-1}$	6.0	−1.0	
胆管胆色素结石粉	ICP-AES	Cu	324.75	0.003	—	0.5	−8.0	47
		Zn	213.80	0.008	—	0.7	−8.0	
		Mn	257.61	0.001	—	0.5	−6.0	
		Fe	259.94	0.003	—	0.5	−3.0	
		Ca	393.37	0.0003	—	0.7	16	
		Mg	279.55	0.0001	—	0.7	−7.0	
		Al	396.10	0.02	—	0.5	−20	
		P	178.29	0.08	—	1.0	0	
		Na	589.00	0.03	—	1.0	−30	
雪莲乌鸡口服液	ICP-AES	Mg	279.55	—	$(0.0001\sim20)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.65	−3.4	48
		Ca	393.37	—	$(0.002\sim200)\mu g \cdot ml^{-1}$	0.56	−8.0	
		Cr	267.72	—	$(0.007\sim300)\mu g \cdot ml^{-1}$	6.67	−0.5	
		Mn	257.61	—	$(0.002\sim300)\mu g \cdot ml^{-1}$	2.34	−2.0	
		Fe	259.94	—	$(0.004\sim100)\mu g \cdot ml^{-1}$	4.58	−1.6	
		Co	220.35	—	$(0.01\sim300)\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−0.8	
		Ni	231.60	—	$(0.02\sim2000)\mu g \cdot ml^{-1}$	6.00	−3.2	
		Zn	206.20	—	$(0.01\sim100)\mu g \cdot ml^{-1}$	0.71	−1.8	
		Al	396.15	—	$(0.02\sim1000)\mu g \cdot ml^{-1}$	7.77	5.2	
		Sr	407.77	—	$(0.0002\sim50)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.46	−2.8	
		Ba	455.40	—	$(0.0005\sim10)\mu g \cdot ml^{-1}$	4.38	1.9	
		P	213.62	—	$(0.05\sim1000)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.03	5.6	
		As	193.76	—	$(0.08\sim800)\mu g \cdot ml^{-1}$	3.95	−6.8	
		Ti	334.94	—	$(0.01\sim200)\mu g \cdot ml^{-1}$	—	−8.4	
中药灰分	ICP-AES	Mo	202.03	0.08	—	2.8	−2.8	49
		Cr	205.55	0.05	—	8.9	−5.5	
		Zn	213.86	0.02	—	4.7	10.0	
		Co	228.62	0.02	—	6.6	8.6	
		Ni	231.60	0.05	—	3.3	−8.9	
		Mn	257.61	0.01	—	5.4	−4.0	
		Fe	259.94	0.03	—	6.2	−1.3	
		Mg	279.55	0.005	—	6.2	0.1	
		V	292.40	0.05	—	5.9	7.2	
		Cu	324.75	0.02	—	1.9	7.0	
		Ti	334.94	0.02	—	3.0	3.3	
		Sr	421.55	0.01	—	8.1	2.2	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
中药灰分	ICP-AES	Li	670.78	0.01	—	10.0	1.8	49
		K	766.49	—	—	3.1	1.8	
药液	ICP-AES	K	766.40	0.4	—	2.13		50
		Na	589.59	0.02	—	2.15		
		Al	396.15	0.028	—	1.60	−10～18	
		Ca	317.93	0.01	—	1.23		
		Mg	279.55	0.001	—	1.32		
		Fe	259.94	0.005	—	0.77		
植物	ICP-AES	B	249.678	0.0012	—	4.2	—	51
植物	直流电弧-AES	Pt	265.942	0.8	—	6.3	−14～10	52
植物样品	ICP-AES	Cd	228.802	0.21	—	1.0	−4.0	53
		Co	228.616	0.34	—	—	36	
		Cr	267.716	0.23	—	9.0	−11.5	
		Cu	324.754	0.37	—	2.6	4.4	
		Fe	328.204	0.18	—	3.8	8.2	
		Mn	257.610	0.06	—	1.8	3.8	
		Mo	202.030	0.32	—	4.2	11.4	
		Ni	231.604	0.38	—	—	−34.3	
		Pb	220.353	1.8	—	4.2	3.7	
		Zn	213.850	0.07	—	1.1	−4.7	
茶叶	He,Ar-MIP-AES	As	228.812	0.0013	(0～4.0)μg·ml⁻¹	—	−1.5	54
		Sb	259.809	0.00046	(0～2.0)μg·ml⁻¹	—	−2.8	
		Se	207.475	0.013	(0～10)μg·ml⁻¹	—	−4.5	
蜜蜂花粉	ICP-AES	Ca	422.673	0.032	—	0.6～1.8	−4.8	55
		Mg	279.553	0.008	—	1.5～2.1	−9.5	
		Al	396.153	0.010	—	1.0～1.2	8.8	
		Fe	259.940	0.042	—	1.2～1.3	−2.9	
		K	766.490	0.008	—	0.6～3.9	−0.4	
		Zn	213.852	0.020	—	1.6～1.9	−1.3	
		Mn	293.306	0.009	—	0.4～4.0	−4.0	
		Cu	327.396	0.005	—	1.5～1.7	−1.5	
		Sr	407.771	0.0003	—	1.1～1.7	−1.0	
		Ba	493.409	0.0003	—	3.5～5.1	−10.0	
		V	290.882	0.003	—	2.3～11.5	−14.0	
		Co	228.616	0.005	—	17.1～45	−6.0	
		Cr	267.716	0.004	—	[illegible].9～5.4	−4.6	
		Ti	334.941	0.002	—	14.7～17.9	−6.0	
		Mo	202.030	0.010	—	—	−7.2	
婴儿奶粉	ICP-AES	K	766.490	0.51	—			56
		Na	589.592	0.019	—			
		Ca	317.933	0.019	—			
		Mg	383.231	0.083	—			
		P	214.914	0.20	—	<10	−10～5	
		Fe	259.940	0.0050	—			
		Zn	213.856	0.0050	—			
		Cu	324.754	0.0081	—			
		Mn	257.610	0.00081	—			
		Sr	346.446	0.00047	—			
低醇发酵饮料	ICP-AES	Zn	202.549	0.0057	—			57
		Ni	231.604	0.010	—			
		Mn	257.610	0.001	—			
		Fe	259.940	0.0055	—			
		Mg	279.079	0.0009	—			
		Si	288.158	0.016	—	−0.56～5.3	−5.0～10.0	
		Cu	324.754	0.006	—			
		Ca	393.366	0.002	—			
		Sr	407.771	0.00027	—			
		Ba	455.403	0.0004	—			
		Sc	361.384	0.00086	—			

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
软饮料	ICP-AES	Pb	220.353	0.002	(0~5)μg·ml⁻¹	−1.3~1.3	—	58
小牛肝、西红柿叶	ICP-AES	Cu	324.7	0.00032	—	1.3	−12.5	59
		Mn	257.6	0.00035	—	2.3	−13.8	
		Ni	341.4	0.00330	—	2.5	−12.0	
		Fe	259.9	0.0140	—	3.0	−12.5	
		Pb	283.3	0.0185	—	1.3	−14.8	
		Cd	326.1	0.0268	—	2.0	−10.7	
罐头食品	ICP-AES	Sn	283.99	—	(0.000001~1.00)μg·ml⁻¹	3	—	60
大米、小麦、茶叶	ICP-AES	Ba	233.53	0.21	—	5.3	—	61
		Co	236.38	0.29	—	5.1	—	
		Fe	259.94	0.01	—	8.5	—	
		Pb	283.31	0.31	—	4.4	—	
		Cu	324.75	0.02	—	7.3	—	
		Mg	279.08	0.34	—	14.0	—	
		Zn	334.50	0.68	—	7.4	—	
牛奶	ICP-AES	C	193.091	2.4	—	2	—	62
食品	ICP-AES	Mo	202.030	0.0007	(0.01~10)μg·ml⁻¹	3.2	−8.0~5.0	63
食品	ICP-AES	Zn	213.856	0.014	—	10.1	−6.1	64
		Ni	231.604	0.014	—	—	−7.2	
		Mn	257.610	0.00081	—	4.2	5.0	
		Fe	259.940	0.038	—	3.2	−8.2	
		Ca	317.933	0.019	(50~400)μg·ml⁻¹	3.6	4.0	
		Cu	324.754	0.0018	—	8.3	0	
		Sr	346.446	0.0084	—	—	−7.8	
		Mg	383.231	0.083	—	3.3	−2.0	
		Na	589.592	0.019	(50~400)μg·ml⁻¹	8.3	2.0	
		K	766.490	1.71	(50~400)μg·ml⁻¹	9.2	2.0	
		P	214.914	0.20	(50~400)μg·ml⁻¹	3.1	2.0	
食品	ICP-AES	Se	196.09	0.0007	(0~0.050)μg·ml⁻¹	—	—	65
绿豆	ICP-AES	Sr	407.77	0.0030	—		4.0	66
		Ba	455.40	0.0015	—		−7.0	
		Cu	324.75	0.0060	—		−3.0	
		In	213.86	0.0030	—		−2.0	
		Mn	257.61	0.0030	—	0.5~10	−3.0	
		Ni	221.65	0.0045	—		9.0	
		Fe	259.94	0.0015	—		3.0	
		Co	281.61	0.0060	—		4.0	
		Al	396.15	0.012	—		−1.0	
莲子	ICP-AES	Mo	202.030	0.02	—	1.2	−8.0	67
		Ni	231.604	0.03	—	5.4	−4.0	
		Zn	213.856	0.06	—	1.8	4.0	
		Cd	226.502	0.01	—	1.9	−5.0	
		Co	228.616	0.09	—	5.1	−7.0	
		Mn	257.610	0.001	—	0.6	4.0	
		Fe	259.940	0.01	—	2.7	6.0	
		Cr	267.716	0.01	—	2.7	−8.0	
		Mg	279.553	0.0003	—	2.3	−7.0	
		Cu	324.754	0.03	—	3.0	0	
		Ca	317.152	0.01	—	4.9	2.0	
		Al	396.152	0.03	—	0.7	−8.0	
		Sr	407.771	0.0001	—	1.3	−1.0	
		Ba	455.403	0.001	—	1.1	−1.0	
吉林人参、西洋参、山西党参、天麻等名贵药材	ICP-AES	Zn	213.86	0.0030	—	3.5	3	68
		Fe	259.94	0.0030	—	1.8	1	
		Cu	324.75	0.0060	—	0.94	−1	
		Cr	283.56	0.0090	—	4.2	4	
		Mn	257.61	0.0030	—	6.2	−2	
		Co	228.62	0.0021	—	5.3	4	
		Ni	221.65	0.0090	—	4.2	2	

续表

样　品	分析方法	测定元素	分析波长/nm	检出限 w/(μg·g⁻¹)	测量范围/%	RSD/%	相对误差/%	文献
吉林人参、西洋参、山西党参、天麻等名贵药材	ICP-AES	Mo	281.61	0.0012	—	3.8	6	68
		Sr	407.77	0.0021	—	1.1	−1	
		Cd	214.44	0.0030	—	2.7	−5	
		Ba	455.40	0.0021	—	1.3	0	
鱼肉	ICP-AES	Hg	253.7	0.0009	(0.01～2.0)$\mu g \cdot ml^{-1}$	1.7	—	69
鱼	ICP-AES	Hg	253.7	0.0013	(0.01～10)$\mu g \cdot ml^{-1}$	1.1	—	70

本表参考文献：

1　光谱实验室.《光电光谱分析》之 3,1993;10(增刊):275～343
2　安德煜.华南师范大学学报(自然科学版),1994;(2):106
3　于爱民,张秉琦,蒋馥等.分析仪器,1995;(2):27
4　胡斌,吉红念,江祖成等.武汉大学学报(自然科学版),1993;(3):73
5　Cave M R, Green K A. At Spectrosc, 1988; 9(5): 149
6　姚士仲.光谱学与光谱分析,1986;6(1):46
7　熊采华,江宝林,王名生.分析测试通报,1992;11(1):64
8　陈　炜,江祖成.分析科学学报,1995;11(1):58
9　安德煜,龚为鹤.分析测试学报,1995;14(2):39
10　陈学芳,高　真.光谱实验室,1994;11(3):27
11　张金生,李丽华,张秉琦等.光谱学与光谱分析,1996;16(4):56
12　徐立强.分析化学,1994;22(6):556
13　范世华,方肇伦.光谱学与光谱分析.1992;12(5):63
14　Baucells M, Lacort G, Roura M. Spectrochim Acta Part B, 1986; 41B(1/2): 189
15　Reimer R A, Miyazaki A. J Anal At Spectrom, 1992; 7(8): 1239
16　Brindle I D, Brindle M E, Le X C et al. J Anal At Spectrom, 1991; 6(2): 129
17　Anderson J. At Spectrosc, 1992; 13(3): 99
18　Cheng C, Akagi T, Haraguchi H. Anal Chim Acta, 1987; 198: 173
19　Dehairs F, Neybergh H, Hoenig M. Anal Chim Acta, 1989; 222(1): 55
20　Махнев Ю А, Деттев М П, ЧАПКО Т А…… Ж анал хим, 1986; 41(7): 1200
21　Nakahara T, Kukui N. Anal Chim Acta, 1985; 172: 127
22　于爱民,徐文国,金钦汉.分析测试通报,1992;11(5):50
23　单永健.理化检验(化学分册),1989;25(2):93
24　Jickells T, Kane M M, Rendell A et al. Anal Proc, 1992; 29(7): 288
25　郭翠花,唐晋娥等.山西大学学报(自然科学版),1994;17(2):164
26　寇兴明,顾永祚.分析试验室,1996;15(5):10
27　Ohta K. Fresenius'Z Anal Chem, 1987; 326(2): 132
28　Lopez Molinero A, Castillo J R, De Vega A. Fresenius'Z Anal Chem, 1988; 331(7): 721
29　Fagioli F, Landi S, Locatelli C et al. J Anal At Spectrom, 1990; 5(6): 519
30　刘文龙,陆小龙.光谱学与光谱分析,1992;12(5):67
31　徐立强,刘瑶函,邹爱民.光谱学与光谱分析,1994;14(6):65
32　Ohta K, Itoh S I, Mizuno T. Talanta, 1991; 38(3): 325
33　朱青新,吉　霖.分析试验室,1996;15(2):86
34　秦永超,江祖成,胡斌等.分析科学学报,1995;11(2):10
35　陈建国,孔令英,江祖成.分析测试通报,1992;11(2):35
36　平田静子,宫地和夫,熊丸尚宏.分析化学(日),1991;40(3):T47
37　张化仁,庄幸,徐卫红.理化检验(化学分册),1988;24(1):28
38　杨慧辉,庄叔希.理化检验(化学分册),1989;25(6):361
39　贾利,尚春林,贾炳韬.理化检验(化学分册),1991;27(4):245
40　王松君,常　平.光谱学与光谱分析,1992;12(1):79
41　曹洪奎,魏军豪,张凤友等.光谱学与光谱分析,1994;14(3):59
42　Lopez-Artiguez M, Camean A, Repetto M. At Spectrosc, 1996; 17(2): 83
43　王松君,常　平,回景周等.环境与健康杂志,1993;10(2):79
44　Castillo J R, Fernandez A, Bona M A. At Spectrosc, 1987; 8(4): 109
45　Roberts N B, Walsh H P J, Klenerman L et al. J Anal At Spectrom, 1996; 11(2): 133
46　Alimonti A, Coni E, Caroli S et al. J Anal At Spectrom, 1989; 4(7): 577
47　孙美雯,于汉芹,戴显伟等.光谱学与光谱分析,1992;12(1):76
48　杨攀.光谱实验室,1993;10(6):13
49　陈大康.理化检验(化学分册),1988;24(2):98
50　吴跃英,马锦秋,宋武元等.光谱实验室,1993;10(4):50
51　秦永超,江祖成,胡斌等.分析化学,1995;23(1):60
52　Otruba V, Strnadova M et al. Talanta, 1993; 40(2): 221
53　Vojka K, Bojan B, Vida H et al. Fresenius J Anal Chem, 1996; 354(5/6): 648
54　Jinfu Yang, Schickling C, Broekaert J A C et al. Spectrochim Acta Part B, 1995; 50B(11): 1351
55　赵玉珍,徐一成,姚凤姬.分析测试通报,1987;6(3):38
56　朱　丹,孙　震,夏玉宇等.光谱实验室,1993;10(5):67
57　刘毅生,卢先勇,林秀华.分析化学,1992;20(3):322
58　Valdes-Hevia Y Temprano M C et al. J Anal At Spectrom, 1993; 8(6): 821
59　彭学军,江祖成,曾云鹗.分析化学,1993;21(12):1410
60　邱德仁,宋立文,张静等.光谱学与光谱分析.1993;13(2):55
61　叶晓云,林添明.光谱学与光谱分析,1992;12(4):59
62　Krushevska A, Barnes R M, Amarasiriwaradena C J et al. J Anal At Spectrom, 1992; 7(6): 845
63　Bin H, Zucheng J, Yune Z. J Anal At Spectrom, 1991; 6(8): 623
64　夏玉宇,朱　丹.食品与发酵工业,1992;(5):63

65 Kardos J, Zimmer K, Coni E et al. Ann Ist Super Sanita, 1989; 25(3): 505

66 黄淑萍，谢苏婧，陈　亮等．山西大学学报(自然科学版)，1993；16(1)：80

67 吴启运，青国模．理化检验(化学分册)．1989，25(2)：106

68 黄淑萍，张　亮．山西大学学报(自然科学版)，1994：17(1)：56

69 段忆翔，杜晓光，金钦汉．岩矿测试，1993；12(1)：17

70 杜晓光，段忆翔，刘军等．吉林大学自然科学学报，1992：(3)：113

表 4-17　MIP-AES 在测定非金属元素的应用-电热进样[3]

元素	λ/nm	电热材料	工作气体	最佳流量/(ml・min^{-1})	等离子体发生器件	前向功率/W	放电管	检出限/μg	线性范围/μg
Cl	479.5	石墨炉	He	—	TM_{010}	—	—	0.001	—
	479.5	石墨炉	He	420	TM_{010}	80	石英管	0.15	—
	479.5	石墨炉	He	1700	TM_{010}	100	硅石管	0.0062	
	479.5	石墨杯	He	800	改进的 TM_{010}	500	熔凝硅石炬	0.00012	0.0038～0.3
	479.5	钽　舟	He	400	TM_{010}	70	—	0.008	0.1～20
	479.5	—	He	—	TM_{010}	—	硅石管	0.002	0.20～50
	725.6	钽　炉	He	200	TM_{010}	75	硅石管	0.8	
	837.6	钨　舟	He	600	改进的 TM_{010}	50	石英管	1.0	—
Br	478.6	石墨炉	He	—	TM_{010}	·	—	0.001	—
	478.6	石墨炉	He	420	TM_{010}	80	石英管	0.55	—
	478.6	石墨棒	He	800	TM_{010}	130	石英管	0.001	0.005～10
	470.5	石墨棒	He	800	TM_{010}	130	石英管	0.001	0.005～10
	470.5	石墨杯	He	800	改进的 TM_{010}	—	熔凝硅石炬	0.0003	0.0038～0.3
	478.6	钽　舟	He	400	TM_{010}	70	—	0.008	0.1～20
	734.8	钽　炉	He	200	TM_{010}	75	硅石管	0.8	
	827.3	钨　舟	He	600	改进的 TM_{010}	50	石英管	2.0	—
	470.5	—	He	—	TM_{010}	—	硅石管	0.001	0.05～50
	478.6	—	He	-	TM_{010}	—	硅石管	0.001	0.05～50
I	206.2	钽　舟	He	—	—	—	—	0.0002	—
	506.1	钽　舟	He	—	—	—	—	0.001	…
	206.2	石墨炉	He	1700	TM_{010}	100	硅石管	0.001	
	206.2	—	Ar	—	TM_{010}	—	硅石管	0.001	0.01～30
	206.2	—	Ar	-	TM_{010}	—	硅石管	0.01	0.01～1
	608.2	钽　炉	He	200	TM_{010}	75	硅石管	4.0	
	804.3	钨　舟	He	600	改进的 TM_{010}	50	石英管	5.0	—
	206.2	钨　丝	Ar	240	Surfatron	80	石英管	0.003	0.015～6.0
F	685.6	石墨炉	He	420	TM_{010}	100	石英管	1.5	…
	823.2	钨　舟	He	600	改进的 TM_{010}	50	石英管	0.5	--
S	216.9	铂丝	Ar	300	TM_{010}	15	石英管	0.2	—
	545.4	石墨炉	He	420	TM_{010}	100	石英管	1.2	—
	564.0	石墨炉	Ar	—	TM_{010}	—	—	0.01	—
	527.9	石墨炉	Ar	1700	TM_{010}	100	硅石管	0.013	
	675.7	钽　炉	Ar	200	TM_{010}	75	硅石管	3.0	
	545.4	—	He	—	TM_{010}	—	硅石管	0.01	0.1～10
P	123.6	钨　舟	He	500	TM_{010}	75	石英管	0.00066	
C	193.0	铂　舟	Ar	200	Eenson¼人腔	100	石英管	0.4	≈16
	193.1	石墨炉	He	420	TM_{010}	80	石英管	0.005	…

表 4-18　MIP-AES 在测定非金属元素的应用-溶液雾化进样法[3]

元素	λ/nm	雾化器类型	工作气体	最佳流量/(ml・min^{-1})	等离子体发生器件	前向功率/W	放电管	检出限/(μg・ml^{-1})	线性范围/(μg・ml^{-1})
Cl	479.5	MAKC 和 MAK 雾化室	He	17500	改进的 TM_{010}	480	可拆卸的开缝式等离子体炬	7	70～21000
	479.5	MAK（不去溶）	He	21000	TM_{010}	480	同心三管式等离子体炬	2 4*	≈1000 ≈1000
	479.5	超声雾化(去溶)	He	21000	TM_{010}	480	同心三管式等离子体炬	0.4	≈1000
	479.5	Meinhard 雾化器	He	1000	高效 TM_{010}	150	切线炬管	2	—
	912.1	熔砂玻片雾化器	He	300	Surfatron	125	熔凝硅石	4～20	—
Br	478.5	MAK(不去溶)	He	21000	TM_{010}	480	同心三管式等离子体炬	60	≈1000
						480		4*	≈1000
	478.6	超声雾化(去溶)	He	21000	TM_{010}		同心三管式等离子体炬	3	≈1000
	478.5	Meinhard 雾化器	He	1000	高效 TM_{010}	150	切线炬管	2	—

续表

元素	λ/nm	雾化器类型	工作气体	最佳流量/(ml·min⁻¹)	等离子体发生器件	前向功率/W	放电管	检出限/(μg·ml⁻¹)	线性范围/(μg·ml⁻¹)
Br	827.2	熔砂玻片雾化器	He	300	Surfatron	125	熔凝硅石	4~20	—
I	206.2	MAK(不去溶)	He	21000	TM_{010}	480	同心三管式等离子体炬	7	≈1000
								11*	≈1000
	546.5	MAK(不去溶)	He	21000	TM_{010}	480	同心三管式等离子体炬	120	≈1000
								70*	≈1000
	206.2	超声雾化(去溶)	He	21000	TM_{010}	480	同心三管式等离子体炬	0.8	≈1000
	546.5	超声雾化(去溶)	He	21000	TM_{010}	480	同心三管式等离子体炬	9	≈1000
	206.2	熔砂玻片雾化器	He	400	Surfatron	150	熔凝硅石	1.6	100~1000
	905.8	熔砂玻片雾化器	He	400	Surfatron	150	熔凝硅石	7.9	—
	206.2	Meinhard 雾化器	He	1000	高效 TM_{010}	150	切线炬管	1.0	—
	206.2	超声雾化器	Ar	320	Surfatron	70	石英管	0.08	0.2~10.0
S	921.3	熔砂玻片雾化器	He	300	Surfatron	125	熔凝硅石	4~20	—
	217.1	Meinhard 雾化器	He	1000	高效 TM_{010}	150	切线炬管	1.2	—
P	213.6	Meinhard 雾化器	He	1000	高效 TM_{010}	150	切线炬管	0.4	—
	213.6	熔砂玻片雾化器	He	400	Surfatron	150	熔凝硅石	0.37	10~5000
	979.7	熔砂玻片雾化器	He	400	Surfatron	150	熔凝硅石	34	—
	253.6	玻璃同心气动雾化器	Ar	500	改进的 TM_{010}	110	石英管	20	
C	193.1	熔砂玻片雾化器	He	—	Surfatron	—	熔凝硅石	12	—

表 4-19 MIP-AES 在测定非金属元素的应用-气相引入样品法[3]

元素	λ/nm	气体发生试剂	产生气体	工作气体	最佳流量/(ml·min⁻¹)	等离子体发生器件	前向功率/W	放电管	检出限/(μg·ml⁻¹)	线性范围/(μg·ml⁻¹)
Cl	257.6	$KMnO_4$-H_2SO_4	Cl_2	Ar	1000	Evenson3/4 入腔	60	硅石管	0.20	0.5~2000
	479.5	K_2SO_4-H_2SO_4	HCl	He	50	TM_{010}	110	熔凝硅石	0.12	0.12~1000
	479.5	H_2SO_4	HCl	He	7500	TM_{010}	450	开缝式等离子体炬	0.21	0.5~500
	479.5	K_2SO_4—H_2SO_4	HCl	He	260	TM_{010}	100	熔凝硅石	0.006	0.1~1000
	479.5	$KMnO_4$-H_2SO_4	Cl_2	He	210	TM_{010}	100	熔凝硅石	0.012	0.1~1000
	479.5③	—	—	He	—	Evenson3/4 入腔	—	石英管	390	—
	479.5②	—	—	He	—	TM_{010}	90	熔凝硅石管	—	—
Br	291.3①	$K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4	Br_2	Ar	2000	Eroida3/4 入腔	30	硅石管	5.0	5~5000
	478.6	$K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4	Br_2	He	430	TM_{010}	130	石英管	0.1	0.5~5000
	470.5	$K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4	Br_2	He	430	TM_{010}	130	石英管	0.1	0.5~5000
	470.5	$K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4	Br_2	He	220	TM_{010}	100	熔凝硅石	0.0018	0.12~200
	470.5	KH_2PO_4-H_3PO_4	HBr	He	305	TM_{010}	100	熔凝硅石	0.024	0.02~200
	478.6②	—	—	He	—	TM_{010}	90	熔凝硅石管	—	—
	478.6	H_2SO_4	HBr	He	7500	TM_{010}	450	开缝式等离子体炬	0.27	1.0~250
N	746.8	NaBr+OH^-	N_2	He	500	改进的 TM_{010}	75	硅石管	0.009	≈5000
	821.6③	—	—	Ar	100	Surfatron	150	石英管	0.4	≈100
C	247.9③	—	—	Ar	300	Evenson 腔	15	石英管	0.05	—

① 分子发射。

② 为直接气体引入。

③ 测定工作气体中的杂质。

参 考 文 献

1 陈新坤主编．原子发射光谱分析原理．天津：天津科学技术出版社，1991：364

2 《光电光谱分析》之 4．光谱实验室．1993；10(增刊)，4~109

3 张金生，张寒琦，金钦汉．光谱学与光谱分析，1992，12 (5)：41

第五章　火焰原子发射光谱法

第一节　火焰原子发射光谱法的方法原理

用火焰进行激发并以光电系统检测被激发元素辐射强度的分析方法，称为火焰原子发射光谱法，也称火焰光度法，它属于原子发射光谱分析范畴，其基本原理是相同的。

火焰原子发射光谱法是将被测成分制成溶液，用压缩空气将试液喷成细雾，并与燃料气体混合在喷灯上燃烧。被测元素在火焰中被激发而产生光谱，经分光器分解成不同波长的谱线，使被测元素特征谱线投射到光电池或光电倍增管上，产生光电流，借检测系统测量谱线强度。谱线强度与元素含量的关系为

$$I=ac^{b} \tag{5-1}$$

式中，I 为谱线强度；c 为元素含量；a 和 b 为常数。a 与元素的激发电位，激发温度及样品组分等有关；b 表示自吸情况。由于用火焰激发，需将样品制成溶液，又由于火焰的温度可通过控制燃料气与助燃气的流量来保持其稳定性，所以 a 是一个较稳定的常数。因为通常样品浓度都很低，所以自吸可以忽略不计，即

$$I=kc \tag{5-2}$$

在测定元素含量时需绘制工作曲线，以便获得待测元素的准确含量。

火焰的温度对原子的激发很重要。煤气和空气混合的低温火焰，只能激发碱金属和碱土金属原子，所以特别适用于硅酸盐、碳酸盐、土壤、肥料、植物、血清，组织液中的 K、Na、Ca 等元素的测定，方法的灵敏度和准确度都较高。乙炔和空气，氧化亚氮和乙炔，氢和氧以及乙炔和氧等混合气体的高温火焰可激发第三族及部分过渡元素。火焰原子发射光谱法的应用范围正在不断扩大。

表 5-1 为火焰原子发射光谱中常用的分析线，表 5-2 为火焰原子发射谱线强度，表 5-3 为火焰原子发射光谱分析的检出限，表 5-4 为火焰原子发射光谱法中元素分析线及其光谱数据。

表 5-1　火焰原子发射光谱中常用的分析线

元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm
Ag	328.068	Cd	228.802	Eu	459.403		769.898	Ni	341.476
	338.289		326.106		601.815	La	579.134		352.454
Al	394.401	Ce	569.700	Fe	371.994		657.851	Os	290.906
	396.152		569.923		385.991	Li	323.263		442.047
As	193.696	Co	345.350	Ga	417.206		670.784	P	253.565
	234.984		352.685	Gd	440.186	Lu	331.211		540.800
	286.004		425.231		451.966		335.956	Pb	368.348
Au	242.795	Cr	425.435	Ge	265.118 }		451.457		405.783
	267.595		520.604		265.158 }	Mg	285.213	Pd	340.458
B	249.678 }	Cs	852.110	Hf	368.224	Mn	403.076		363.470
	249.773 }		894.350		531.160 Ⅱ		403.307	Pr	493.974
Ba	455.403 Ⅱ	Cu	324.754	Hg	253.652	Mo	379.820		495.136
	553.548		327.396	Ho	405.393		390.296	Pt	265.945
Be	234.861	Dy	404.599		410.384		386.411		306.471
Bi	223.061		418.678		660.494	Na	588.995	Ra	381.440 Ⅱ
	306.772		421.172	In	410.176		589.592		482.590
	472.219	Er	400.797		451.131	Nb	405.894	Rb	780.023
Ca	393.367 Ⅱ		415.110	Ir	380.012	Nd	488.381		794.760
	422.673		582.679	K	766.491		492.453	Re	346.046
								Rh	369.236

续表

元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm
Rh	437.480	Si	251.611		481.275	Tl	377.572	Y	362.094
Ru	372.803	Sm	472.844	Tb	431.885		535.046		410.238
Sb	259.805		476.027		432.647	Tm	371.792		643.500
	259.809		488.377	Te	214.275		410.584	Yb	398.798
	231.147		488.397		486.620	U	541.540	Zn	213.856
Sc	391.181	Sn	283.999	Th	491.982 I	V	411.178	Zr	351.960
	402.040		326.234		576.055		437.924		360.119
	630.567	Sr	460.733	Ti	365.350	W	400.875		
Se	203.985	Ta	474.016		399.864		407.436		

表 5-2 元素的火焰原子发射谱线强度[1]

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$^{①}_{R}$	氧-氢	(氧-氢)$^{①}_{R}$	氧-乙炔	(氧-乙炔)$^{①}_{R}$
Ag	328.07	100	—	100	乙醚+乙醇+水 (1+2+1) 100	50	乙醚+乙醚+水 (1+2+1) 30
	338.29	250	—	170	170	50	40
Al	394.40	0.3	—	0.8	甲基异丁基酮 20	1	甲基异丁基酮 100
	396.15	0.35	—	1.0	30	2	200
AlO	464.8	0.8	—	1.7	甲基异丁基酮 10	0.13	甲基异丁基酮 17
	467.2			2	10	0.15	17
	469.5			1.7	7	0.14	11
	471.6			1.7	5	0.13	6
	484.2	1.5	—	3	50	0.3	70
	486.6			3	30	0.25	50
	507.9	1	—	2	7	0.15	11
	510.2			2	10	0.18	17
	512.3			2	10	0.18	17
	514.3			2	—	0.17	7
As	228.81	—	异丙醇 2.5	—	—	—	甲基异丁基酮 3
	234.98	—	4	—	—	0.1	5
	249.29	—	50%异丙醇 0.7	—	—	—	—
(As)④	500	2	—	—	—	—	—
AsO	250.4	—	50%异丙醇 0.7	—	—	—	—
Au	242.80	0.1	—	1	—	1.1	—
	267.60	0.3	—	2	—	1.7	—
BO_2	453	1	—	7	4%丁醇 15	1.2	50%甲醇 2.5
	471.5	2.5	—	20	30	2.5	5
	494	5	—	30	50	5	8
	518.0	8	—	50	80	6	15
	547.6	11	—	60	90	15	17
	579	7	—	30	70	10	10
	603	2	—	10	70	7	5
	620	1.5	—	7	50	3	3
Ba	553.56	170	—	40	4%丁醇 100	10	石脑油 50
Ba^+	455.40	8	—	8	4%丁醇 20	5	石脑油 100
	493.41	80	—	25	40	5	100
BaO	496.5	80	—	25	4%丁醇 35	1.7	石脑油 3
	521.4	80	—	25	35	2	3
	534.9	80	—	20	30	2	2.5

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$^{①}_{n}$	氧-氢	(氧-氢)$^{①}_{n}$	氧-乙炔	(氧-乙炔)$^{①}_{n}$
BaO	549.2	80	—	20	25	1.7	2.5
	564.4	80	—	20	22	1.5	2.5
	570.1	80	—	20	25	1.7	2.5
	586.4	70	—	20	25	1.7	—
BaOH	488	100	—	30	4%丁醇 40	2	石脑油 5
	502	80	—	25	35	1.7	3
	513	150	—	30	50	3	5
	524	80	—	25	35	3	3
	745	50	—	10	苯，10	7	(100)[2]
	830	200	—	30	25	15	(300)
	873	80	—	30	25	15	(300)
Be	234.86	0.00	—	0.00	—	25	甲醇，100
BeO	470.9			0.7	—	0.25	—
	473.3	0.2	—	0.5	—	0.2	—
	475.5			0.4	—	0.11	—
	505.5			0.25	—	0.10	—
	507.6	0.1	—	0.25	—	0.10	—
	509.5			0.25	—	0.10	—
Bi	223.0	—	异丙醇 7	—	—	—	甲基异丁基酮 1.5
	227.66	—	0.3	—	—	—	—
	306.77	0.2	85%异丙醇 0.2	0.017	—	0.01	—
(BiH)[2]	472.26	0.5	0.00	0.25	异丙醇 0.005	0.05	—
	439.4	0.3	—	0.04	—	0.003	—
	442.4	0.3	—	0.05	—	0.004	—
BiO	556.4	0.5	—	0.10	—	0.01	—
Ca	422.67	250	—	1000	4%丁醇 1700	250	乙醚+乙醇+水 (1+2+1) 1000
Ca^{+}	393.37	—	—	25	—	30	—
	396.85	—	—	20	—	17	—
CaO	815.3	—	—	1.5	—	5	—
	865.2	—	—	2	—	7	—
CaOH	554	500	—	1700	4%丁醇 2500	170	乙醇+乙醚+水 (1+2+1) 700
	572	25	—	100	200	20	50
	602	100	—	700	1000	250	300
	622	500	—	2500	5000	500	1000
	644	70	—	300	700	70	120
Cd	228.80	0.2	异丙醇 30	1	50%异丙醇 17	0.25	甲基异丁基酮 2.5
	326.11	20	6	2	丙酮 5	0.25	丙酮 5
(Ce)	550~600	70	—	10	丙酮 10	0.7	—
CeO	468.4	25	—	5	丙酮 2.5	0.5	—
	481	30	—	5	5	0.5	—
	494	40	—	7	5	0.7	—
Co	340.51	40	—	20	4%丁醇 30	5	—
	341.25	40	—	25	30	3	—
	343.2	10	—	4.5	7	1.5	—
	344.32	20	—	10	20	2.5	—
	344.93	25	—	12	25	3	—

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$_N$[②]	氧-氢	(氧-氢)$_N$[②]	氧-乙炔	(氧-乙炔)$_N$[①]
Co	345.4	45	—	25	50	7	—
	346.5	20	—	12	25	3	—
	347.40	17	—	7	12	2	—
	350.23	30	—	17	30	3	—
	350.63			9	20	2	—
	351.3	20	—	15	25	3	—
	352.8	35	—	35	CCl_4 100	7	—
	356.94	20	—	8	4%丁醇 15	1.7	—
	357.52			15	25	2.5	—
	359.49	17	—	10	17	2	—
	384.55	22	—	11	17	2	
	387.35	30	—	20	30	4	—
	389.44	22	—	10	17	2	—
	399.53	25	—	9	15	2	—
	412.0	25	—	11	20	2	—
CoO	563.5	—	—	17	—	—	—
Cr	357.87	40	25%异丙醇 15	80	石脑油 80	20	甲基异丁基酮 1000
	359.35	35	14	70	70	17	800
	360.53	30	13	55	55	15	500
	425.43	120	15	100	60%丙酮 150	20	900
	427.48	110	8	80	110	17	550
	428.97	100	—	70	80	12	300
	520.6	170	—	70	4%丁醇 70	10	100
CrO	535.6	200	—	20	70	10	—
	541.7	200	—	20	80	10	—
	556.4	200	—	20	90	10	—
	562.3	200	—	20	90	10	—
	579.4	250	—	20	120	15	—
	585.2	250	—	25	100	17	—
	605.2	250	—	25	100	20	—
	639.4	—	—	10	50	17	—
	683.0	—	—	10	50	15	—
Cs	455.54	20	—	25	4%丁醇 30	0.3	—
	459.32	5	—	7	15	0.1	—
	852.11	1000	—	1000	2000	1000	—
	894.35	300	—	500	700	500	—
Cu	324.75	60	25%异丙醇 40	100	甲醇 500	100	火油 300
	327.40	40	25	100	500	100	300
	510.55	—	—	8	4%丁醇 11	7	—
CuH	428.0	—	—	3	4%丁醇 2.5	0.7	—
CuO	606.0	—	—	5	4%丁醇 5	3	—
CuOH	505	50	—	7	4%丁醇 9	2.5	—
	524	70	—	12	15	5	—
	537	100	—	17	20	6	—
DyO	457.2	—	—	8	甲基异丁基酮 10	—	—
	515	—	—	20	30	—	—
	520	—	—	25	30	—	—

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)[①]$_R$	氧-氢	(氧-氢)[①]$_R$	氧-乙炔	(氧-乙炔)[①]$_R$
DyO	526.3	—	—	70	80	—	—
	540.4	—	—	60	70	—	—
	549.3	—	—	60	70	—	—
	572.9	—	—	120	150	—	—
	583.4	—	—	120	150	—	—
	586	—	—	110	140	—	—
	600.6	—	—	15	70	—	—
	605	—	—	15	70	—	—
	608	—	—	15	55	—	—
ErO	504 506.7	—	—	30	甲基异丁基酮 55	—	—
	515	—	—	17	30	—	—
	546	—	—	40	60	—	—
Er	553	—	—	50	80	—	—
	559.6 561.3	—	—	35	70	—	—
	567	—	—	25	50	—	—
Eu	459.40	—	—	25	甲基异丁基酮 35	10	—
	462.72	—	—	20	30	10	—
	466.19	—	—	17	25	10	—
	601.82	—	—	100	120	(10)	—
(EuOH)	598	—	—	100	甲基异丁基酮 120	(10)	—
	623	—	—	70	100	(10)	—
	647	—	—	25	150	(10)	—
	684	—	—	20	100	(10)	—
	702	—	—	50	100	(10)	—
Fe	248.33	—	75%异丙醇 3.5	—	—	—	—
	302.06	4	25%异丙醇 5	2.5	甲基异丁基酮 50	1.5	—
	344.06	35	—	6	4%丁醇 10	2	—
	358.12	50	—	6	10	1.2	10
	371.99	80	11	40	CCl_4 100	15	100
	373.71	80	10	30	4%丁醇 50	8	70
	374.7	70	8	25	50	6	50
	382.04 382.5	50	3.5	11	20	1.7 2	10 12
	385.99	70	9	35	50	11	70
	387.86 388.63	60	—	7 12	12 20	1.2 2.5	8 20
	389.97	50	—	5	10	0.9	5
	392.2 392.9	50	1.7	80	17	1.0 1.5	7 10
	438.35	50	—	5	15	0.9	丙酮 1.7
	526.95	70	—	17	60	3.5	50%甲醇 1.7
	532.81	70	—	15	60	3.5	1.7
FeO	553.2	100	—	20	4%丁醇 80	6	50%甲醇 2.5
	561.4	150	—	35	110	9	3
	564.7	170	—	40	120	10	3
	579.0 581.9 586.8	170	—	40 40 40	110 120 100	10 11 10	3 3 —

续表

元 素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)[①]	氧-氢	(氧-氢)[①]	氧-乙炔	(氧-乙炔)[①]
FeO	609.5	100	—	20	50	12	—
	618.1	100	—	20	50	10	—
	621.9	100	—	20	50	10	—
Ga	294.4	—	—	1	—	0.2	—
	403.30	10	—	100	4%丁醇 150	10	—
	417.21	20	—	200	300	20	
Gd	591.14	(10)	—	80	甲基异丁基酮 250	(20)	—
GdO	461.7	—	—	17	甲基异丁基酮 30	—	—
	463.4	—	—	15	15	—	—
	489.3	—	—	12	15	—	—
	491.0	—	—	12	20	—	—
	492.8	—	—	7	15	—	—
	540.5	—	—	12	20	—	—
	545	—	—	15	25	—	—
	569	3	—	35	70	—	—
Gd	581	(5)	—	50	120	(10)	—
	592.7	(10)	—	80	250	(20)	—
	599	(10)	—	80	250	(20)	—
	608.1	(10)	—	70	200	(20)	—
	613	(10)	—	70	200	(20)	—
	621	(10)	—	70	250	(20)	—
Ge	259.25	—	异丙醇 0.7	—	50%异丙醇 0.025	0.015	50%异丙醇 0.025
	265.14	0.00	2	0.01	0.03	0.04	0.05
	270.96	—	0.4	—	—	0.01	0.02
	275.46	—	0.7	—	—	0.008	—
Hg	253.65	1.7	异丙醇 2.5	0.3	丙酮 1.7	0.2	—
HoO	510.5	—	—	35	甲基异丁基酮 40	—	—
	515.7	—	—	50	50	—	—
	527	—	—	50	50	—	—
	532.0	—	—	50	50	—	—
	566.0	—	—	120	170	—	—
	569.6	—	—	110	150	—	—
	584.9	—	—	35	50	—	—
IO	469.4	—	—	(1)	—	—	—
	484.5	—	—	(1)	—	—	—
	496.4	—	—	(1)	—	—	—
	513.1	—	—	(1)	—	—	—
	520.9	—	—	(1)	—	—	—
	530.8	—	—	(1)	—	—	—
	553.3	—	—	(1)	—	—	—
	573.0	—	—	(1)	—	—	—
In	303.94	5	—	3	4%丁醇 3	3	—
	325.61	10	25%异丙醇 3	10	10	2.5	丙酮 30
	410.18	150	50	200	300	50	110
	451.13	250	80	350	500	70	140
InO	428.3	—	—	1	—	—	—
K	404.5	30	25%异丙醇 1	70	4%丁醇 100	10	丙酮 6
	766.49 769.90	10000	—	30000	50000	30000 20000	— —

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)①	氧-氢	(氧-氢)①	氧-乙炔	(氧-乙炔)①
LaO	438.4	5	—	25	甲基异丁基酮 25	17	甲基异丁基酮 80
	442.3	5	—	25	30	17	80
	538.1			15	25	5	15
	540.7	3	—	20	30	7	20
	543.2			20	30	7	25
	545.8			17	30	6	20
	560.1	17	—	70	100	17	170
	562.7			50	100	17	170
	586.8			10	25	12	100
	589.5	3	—	10	25	12	100
	592.2			10	25	12	100
	743	30	—	20	1000	100	120
	792	25	—	20	1000	100	150
La	550.13	—	—	—	—	100	—
Li	460.29	—	—	2.5	4%丁醇 3	0.5	4
	610.36	30	—	20	30	10	40
	670.78	10000	25%异丙醇 1500	50000	70000	10000	50000
LuO	466.2	—	—	30	甲基异丁基酮 80	—	—
	517.0	—	—	50	110	—	—
	599	—	—	20	40	—	—
	675	—	—	10	30	—	—
Mg	285.21	100	25%异丙醇 20	100	丙酮 250	170(富燃)	乙醚+乙醇+水 (1+2+1)100
	517.1 518.36	—	—	5	4%丁醇 20	0.6	0.5
MgO	600.7	—	—	10	4%丁醇 25	1.7	2
MgOH	362.4	100	25%异丙醇 30	25	乙醚+乙醇+水 (1+2+1) 25	1	—
	370.2	500	60	100	100	5	—
	381～383	500	50	80	80	3.5	—
	387.7	200	—	50	50	1.7	—
	391.2	200	—	50	50	1.7	—
Mn	279.48	—	—	15	汽油 17	1.8	—
	279.83	—	—	11	15	1.7	—
	280.11	—	—	8	11	1.5	—
	403.2	500	—	1000	石脑油 1500	500	2000
MnO	515.9			20	4%丁醇 30	3	—
	519.2	50	—	25	40	4	—
	522.9			25	35	3.5	—
	536.0			45	70	8	—
	539.0	100	—	50	80	8	—
	542.4			35	70	7	—
	558.6	120	—	80	120	17	—
	561.0			60	100	17	—
	586.0			40	50	8	—
	588.1	70	—	50	70	8	—
	591.0			40	50	8	—
	617.6	30	—	25	30	5	—
MnOH	363.410	70	—	10	4%丁醇 8	—	—
Mo	379.83	2.5	80%异丙醇 0.00	0.8	石脑油 10	(0.5)	异己酮+丙酮+ 异丙醇+水

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$^{①}_{n}$	氧-氢	(氧-氢)$^{①}_{n}$	氧-乙炔	(氧-乙炔)$^{①}_{n}$
Mo							(5+2+2+1) 20
	386.41	3	0.0	0.8	10	(0.3)	20
	390.30	3	0.0	0.8	5	(0.25)	20
(MoO_2)	550~600	25	—	10	—	(3)	—
Na	330.3	2.5	—	20	4%丁醇 10	10	50
	568.6	—	—	30	40	10	—
	589.2	30000	—	50000	70000	25000	100000
	819	—	—	5	10	20	—
(Nb)	450	5	—	1	—	0.17	—
	550	5	—	1	—	0.3	—
Nb	405.89	—	—	—	—	0.3	—
NdO	461.9	—	—	3	甲基异丁基酮 5	—	—
	531.3	—	—	5	10	—	—
	599	—	—	10	25	1	—
	622	—	—	2.5	20	0.7	—
	637	—	—	2.5	30	2	—
	643	—	—	2.5	40	3	—
	650.0	—	—	5	60	5	—
	661	—	—	10	100	10	—
	691	—	—	10	500	5	—
	702	—	—	10	500	10	—
	712	—	—	10	500	10	—
Ni	231.10	—	75%异丙醇 4	—	—	—	—
	232.0	—	5	—	—	—	—
	300.3	4	25%异丙醇 3.5	3	4%丁醇 5	1.1	—
	336.96	17	5	9	17	3	丙酮 7
	338.06	12	4	7	10	2.5	5
	339.3	25	7	17	25	5	12
	341.48	80	25	50	60	10	甲基异丁基酮 40
	343.36	15	3	10	12	3	10
	344.63	20	5	12	20	5	15
	346.0	45	15	20	30	7	25
	347.25	7	3	4	6	2.5	5
	349.30	25	10	17	25	7	20
	351.03 351.51	45	15	7 22	10 30	5 9	8 30
	352.45	80	25	50	80	15	60
	356.64	20	5	10	15	3	10
	361.05	15	3	7	10	2.5	5
	361.94	40	10	22	30	5	20
	385.83	10	—	4	10	1.7	—
(Ni)	520~600	—	—	17	4%丁醇 35	—	—
NiO	502.4	—	—	12	4%丁醇 30	—	—
	317.5	—	—	15	35	—	—
(P)	520	30	—	—	—	—	—
PO	237.5	0.4	异丙醇 8	空气-氢-乙炔火焰 1	—	—	—
	238.3	0.4	8	1	—	—	—
	239.6	0.22	4.5	0.5	—	—	—

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)①	氧-氢	(氧-氢)①	氧-乙炔	(氧-乙炔)①
PO	246.4	0.5	10	1.4	—	—	—
	247.8	0.4	8	1	—	—	—
	252.9	0.2	4	0.5	—	—	—
	254.0	0.12	2.5	0.3	—	—	—
Pb	217.0	—	异丙醇 1.5	—	汽油 2	—	—
	247.64	—	甲醇 1.1	—	2.5	—	—
	261.42	—	4	—	11	—	—
	266.32	—	1	—	3.5	—	—
	280.20	—	4	—	9	—	—
	283.31	—	1	0.4	2.5	—	汽油 4
	363.96	1.5	汽油 2	5	7	0.1	5
	368.35	3	4	10	15	0.2	10
	405.78	3	4	10	15	0.3	10
Pd	340.46	45	—	70	甲基异丁基酮 200	10	—
	342.12	11	—	10	50	2	—
	346.08	6	—	10	20	2	—
	351.69	8	—	20	40	2	—
	360.95	30	—	45	90	7	—
	363.47	55	—	80	150	10	—
(Pd)	500	30	—	—	—	—	—
PrO	515.7	—	—	7	甲基异丁基酮 3	—	—
	535.2	—	—	10	6	—	—
	537	—	—	10	6	—	—
	561	—	—	11	8	—	—
	569.1	—	—	12	10	—	—
	576.3	—	—	15	11	—	—
	601.9	—	—	10	20	—	—
	628	—	—	5	11	—	—
	636.3	—	—	5	15	—	—
	648	—	—	5	17	—	—
	695	—	—	(10)	50	—	—
	709.5	—	—	(10)	50	—	—
	732.0 737.6	—	—	(10)	30	—	—
	766.3	—	—	(10)	20	—	—
	805	—	—	(5)	10	—	—
	848.9	—	—	(2)	5	—	—
Pt	265.95	0.11	—	0.8	—	0.5	甲基异丁基酮 0.7
	306.47	0.25	—	1	—	0.7	—
Ra	482.59	—	—	(5)	—	—	—
Ra^+	381.44	—	—	(3)	—	—	—
	468.23	—	—	(1)	—	—	—
(RaOH)	602	—	—	(1)	—	—	—
	627	—	—	(5)	—	—	—
	665	—	—	(5)	—	—	—
Rb	420.19	20	—	35	4%丁醇 50	2	—
	421.56	10	—	15	20	1	—
	780.02	3500	—	3500	5000	2000	—
	794.96	2500	—	2500	3000	1700	—
Re	346.05	0.00	50%异丙醇	0.00	50%异丙醇	0.035	50%丙酮

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$_n$[①]	氧-氢	(氧-氢)$_n$[①]	氧-乙炔	(氧-乙炔)$_n$[①]
Re			0.00		0.00		0.08
	346.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.018	0.045
Rh	332.31	2	—	2.5	异丙醇 3.5	1.7	90%异丙醇 3
	339.68	4	—	8	12	5	8
	343.49	2.5	—	15	25	9	17
	350.25	3.5	—	8	10	5	8
	352.80	3	—	7	9	4	7
	358.31	4.5	—	4	4	1.7	3
	359.66	5	—	5	5	2.2	4.5
	365.80	6	—	11	15	6	9
	369.24	7	—	35	40	15	22
	370.09	6	—	11	11	4.5	8
	385.65	7	—	4	3.5	1.5	3
	421.11	11	—	5	3	1.1	1.8
	437.48	15	—	8	4	1.7	2.2
(RhO)	542.5	40	—	15	—	1	—
Ru	342.83	—	—	2	50%甲醇 15	1.5	—
	343.67	—	—	1	10	1	—
	349.89	—	—	5	30	3	—
	359.3	—	—	1	10	1	—
	366.14	—	—	2	20	2	—
	372.75	—	—	20	150	30	—
	379.9	—	—	10	100	25	—
	369.90	—	—	0.5	5	1	—
Sb	217.58	—	异丙醇 17	—	—	0.09	—
	231.15	0.07	25	—	—	—	甲基异丁基酮 15
	252.85	0.01	8	—	—	0.1	10
	259.81	0.025	7	—	—	0.1	10
SbO	257.4	1	40%异丙醇 0.5	—	—	—	—
ScO	467.3	—	—	10	甲基异丁基酮 25	—	—
	470.7	—	—	12	35	—	—
	474.2	—	—	8	25	—	—
	485.8	—	—	20	60	—	—
	489.4	—	—	15	45	—	—
	509.7	—	—	8	30	—	—
	513.4	—	—	9	35	—	—
	517.1	—	—	8	25	—	—
	573.7	—	—	17	60	2	—
	577.3	—	—	35	120	3	—
	581.1	—	—	40	150	5	—
	584.9	—	—	40	150	5	—
	588.8	—	—	35	120	3	—
	592.8	—	—	30	100	3	—
	601.7 603.6	—	—	170	800	20	—
	607.3	—	—	250	1700	30	—
	611.0	—	—	200	1200	25	—
	615	—	—	110	700	10	—
	619.1	—	—	50	400	5	—
	623	—	—	30	250	3	—
	649	—	—	10	70	1	—
Si	250.69	空气-氧-氢-	50%异丙醇	—	—	0.16	甲醇

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$^{①}_{n}$	氧-氢	(氧-氢)$^{①}_{n}$	氧-乙炔	(氧-乙炔)$^{①}_{n}$
Si		乙炔火焰					0.5
		0.009	0.00				
	251.61	0.025	0.00	—	—	0.5	1.5
	252.41	0.007	0.00	—	—	0.14	0.45
	252.85	0.008	0.00	—	—	0.15	0.5
SiO	234.4	空气-氧-氢-乙炔火焰 0.03	50%异丙醇 0.00	—	—	—	—
	241.4	0.02	0.00	—	—	—	
	248.7	0.01	0.00	—	—	—	甲醇 0.2
Sm	471.66	—	—	10	甲基异丁基酮 10	—	—
	586.81	—	—	30	50	0.3	—
SmO	582.0	—	—	20	甲基异丁基酮 30	0.2	—
	595	—	—	35	60	0.4	—
	598.8	—	—	35	60	0.4	—
	603.5	—	—	35	70	0.5	—
	614	—	—	40	80	2	—
	624.3	—	—	30	80	2.5	—
	633.9	—	—	20	80	2	—
	638	—	—	20	100	2	—
	642	—	—	20	100	2	—
	651.0	—	—	20	110	3	—
	667	—	—	5	60	0.5	—
	681	—	—	3	40	0.3	—
Sn	224.61	—	异丙醇 8	0.00	异丙醇 0.6	—	甲基异丁基酮 2
	235.48	—	甲醇 20	0.00	1.5	1.3	5
	242.95	空气-氢-乙炔火焰 7	20	氧-氢-乙炔火焰 6	1.5	1.4	6
	270.65	空气-氢 0.08	16	氧-氢 0.012	—	1.7	甲醇 1.7
	284.00	0.08	12	(0.015)	—	0.2	—
	286.33	0.11	10	0.017	—	0.03	—
	300.91	0.2	8	0.04	—	0.017	—
	303.41	0.4	16	0.05	石脑油 10	0.05	—
	317.50	0.12	异丙醇 7	—	—	0.017	—
	326.23	0.4	10	—	—	0.4	—
	333.06	—	1.7	—	—	0.4	—
	380.10	2.5	3	—	—	0.3	—
SnO	326.2	0.4		0.09	60%丙酮 0.08	0.17	—
	332.3	1.5	—	0.35	0.2	0.2	—
	338.8	2.5	—	0.7	0.18	0.2	—
	341.6	3	—	0.7	0.18	0.12	—
	348.5	1.5	25%异丙醇 0.5	0.25	0.17	0.2	—
	358.5	3.5	0.5	0.9	0.22	0.2	—
	369.1	2.5	0.5	0.7	0.15	0.17	—
	372.1	2.5	0.35	0.7	0.15	0.15	
	383.3	2.5	—	0.6	0.11	0.08	—
	386.5	3.5	0.25	0.7	0.11	0.08	—
	398.4	3	—	0.5	0.08	0.07	—

续表

元 素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)①	氧-氢	(氧-氢)①	氧-乙炔	(氧-乙炔)①
(SnO)	485	5	25%异丙醇 0.25	1000	60%丙酮 2000	200	—
Sr	460.73	500	25%异丙醇 150	1000	60%丙酮 2000	200	—
Sr^+	407.77	—	—	30	4%丁醇 50	17	—
	421.55	—	—	20	30	12	—
Sr_2O_2	594.3	500	—	[illegible]	4%丁醇 100	10	—
	597.0	500	—	80	100	10	—
SrOH	605.9	5000	25%异丙醇 250	1000	4%丁醇 1500	100	—
	646.5	250	—	100	150	10	—
	659	500	—	200	300	20	—
	666	500	—	700	1000	40	—
	682	250	—	1000	1000	30	—
	704	—	—	70	100	—	—
TbO	461	—	—	8	甲基异丁基酮 10	—	—
	535	—	—	40	60	—	—
	544	—	—	30	40	—	—
	563.9	—	—	40	70	—	—
	573	—	—	50	100	—	—
	592.1	—	—	80	170	10	—
	597.9	—	—	70	150	10	—
	607.8	—	—	40	100	10	—
	634.9	—	—	17	30	5	—
Tb	432.65	—	—	—	—	10	—
	390.13	—	—	—	—	2.5	—
Te	238.32 238.58	0.01	异丙醇 1	—	—	0.00	—
TeO	356.1	2.5	—	0.15	—	0.015	—
	360.7	3	—	0.2	—	0.015	—
	366.2	3.5	—	0.2	—	0.015	—
	371.4	3.5	—	0.3	—	0.015	—
	377.2	3.5	—	0.2	—	0.015	—
	382.7	3.5	—	0.25	—	0.017	—
	388.4	3.5	—	0.25	—	0.017	—
	394.7	3.5	—	0.25	—	0.017	—
	400.7	3.5	—	0.22	—	0.017	—
	407.5	3.5	—	0.22	—	0.017	—
	413.2	3.5	—	0.25	—	0.017	—
	420.5	3.5	—	0.22	—	0.017	—
	426.8	3	—	0.22	—	0.017	—
	434.3	3.5	—	0.22	—	0.017	—
	448.7	3	—	0.22	—	0.017	—
	464.0	2.5	—	0.17	—	0.017	—
TiO	480.6	—	—	30	—	0.7	异丙醇 0.7
	484.9	—	—	30	—	0.8	0.8
	495.6	—	—	35	—	1.1	1.1
	500.0	—	—	35	—	1.1	1.1
	516.8	—	—	40	—	1.5	1.5
	545.0	—	—	45	—	1.5	1.5
	576.1	—	—	45	—	1.5	1.5
	673	—	—	20	—	10	
	713	—	—	20	—	10	
Tl	276.79	0.5	—	1.5	—	0.5	—

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$_n^{①}$	氧-氢	(氧-氢)$_n^{①}$	氧-乙炔	(氧-乙炔)$_n^{①}$
Tl	351.92	4	—	3	4%丁醇 25	0.7	辛-2-酮 2
	377.57	50	—	100	170	10	30
	535.05	30	—	70	100	5	20
TmO	481.4	—	—	22	甲基异丁基酮 35	—	—
	490	—	—	30	50	—	—
	495	—	—	25	45	—	—
	523	—	—	17	35	—	—
	532.9	—	—	30	55	—	—
	537	—	—	35	60	—	—
	542	—	—	35	60	—	—
	553	—	—	35	60	—	—
(UO_2)	550	15	—	5	—	1	—
VO	505.7	70	50%异丙醇 10	25	4%丁醇 70	1.2	—
	522.9	80	18	30	80	3	—
	527.6	80	20	30	80	3	—
	547.0	100	17	40	100	4	—
	573.7	110	30	40	110	6	—
	608.7	50	25	20	50	3	—
	701.1 } 707.0 }		—	10	—	1	—
V	747	—	—	7	—	7	—
	800	—	—	10	—	10	
	318.4	—	—	—	—	0.25	50%甲醇 0.4
YO	465.0	—	—	8	甲基异丁基酮 17	—	—
	467.7	—	—	10	20	—	—
	470.7	—	—	9	18	—	—
	481.8	—	—	30	50	—	—
	484.2	—	—	22	40	—	—
	505.0	—	—	7	20	—	—
	507.8	—	—	6	20	—	—
	574	—	—	8	50	1	—
	587	—	—	10	50	1	
	599	—	—	300	1000	30	甲基异丁基酮 70
	615	—	—	300	800	30	50
Yb	346.44	—	—	2	—	(1)	—
	398.80	70	—	25	甲基异丁基酮 120	(10)	—
	555 } 555.65 }	250	—	70	60	(10)	—
Yb^+	369.42	—	—	1.5	—	(0.5)	—
(YbOH)	477.8	100	—	22	甲基异丁基酮 35	(2)	—
	485.0	100	—	25	35	(2)	—
	498.1	200	—	50	50	(5)	—
	517.4	150	—	40	40	(3)	—
	532.5	250	—	80	80	(5)	—
	544.3	120	—	35	45	(3)	—
	572.5	300	—	110	100	(10)	—
	587	80	—	25	35	(2)	—
	602	30	—	10	25	(1)	—
Zn	213.86	0.04	50%异丙醇 0.15	0.06	丙酮 1	0.017	甲基异丁基酮 0.13
	481.05	0.3	—	0.06	石脑油		丙酮

续表

元素	λ/nm	在各种火焰中的强度					
		空气-氢	(空气-氢)$_n$①	氧-氢	(氧-氢)$_n$①	氧-乙炔	(氧-乙炔)$_n$①
Zn					0.6		1.7
	307.59	0.1	0.00	0.02	—	—	—
(Zn)	520～600	0.5	---	0.12	丙酮 12	—	丙酮 4
ZrO	564	—	—	1.2	—	(0.1)	—
	574	—	—	1.2	—	(0.1)	—

① n 指非水溶剂。

② 元素附加（ ）时，指未知源的连续光谱，分子附加（ ）时，表示不确定。

③ 强度值附加（ ）时，指估计值。

表 5-3　火焰原子发射光谱分析法的检出限

（按元素符号次序排列）

元素	λ/nm	火焰	检出限/(μg·ml^{-1})	文献
Ag	328.068	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	328.068	预混 N_2O-C_2H_2	0.002	Spectrochimi Acta,1972;27B:391
	328.068	隔离的 N_2O C_2H_2	0.02	Spectrosc Lett,1970;3:267
	328.068	氧化亚氮-氢	0.07	Spectrosc Lett,1970;3:267
	328.068	隔离的氧化亚氮-氢	0.06	Spectrosc Lett,1970;3:267
	328.068	N_2O-MAPP①	0.08	Spectrosc Lett,1970;3:267
	328.068	隔离的 N_2O-MAPP①	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	338.289	氧-氢	0.06	Beckman Bulletin,1959:753
	338.289	空气-氢	0.04	Symposium on Spectroscopy ASTM 1960
	338.289	氧-乙炔	0.03	Analyst,1969;94:1969
			1.3	Завод лаб,1989;55(12):32
Al	396.153	预混氧-乙炔	0.2	Anal Chem,1967;39:466
	394.403	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	396.153	隔离的 N_2O-C_2H_2	0.03	Spectrosc Lett,1970;3:267
	396.153	预混 N_2O-H_2	7	Spectrosc Lett,1970;3:267
	396.153	隔离的 N_2O-H_2	5	Spectrosc Lett,1970;3:267
	396.153	预混 N_2O-MAPP	2.5	Spectrosc Lett,1970;3:267
	396.153	隔离的 N_2O-MAPP①	3	Spectrosc Lett,1970;3:267
	396.153	预混 N_2O-C_2H_2	0.003	Spectrochimi Acta,1972;27B:391
	394.403	隔离的 N_2O-C_2H_2	0.2	Spectrochimi Acta,1969;24B:325
	396.15	空气-乙炔	0.03	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
	396.15	N_2O-乙炔	0.013	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
As	193.696	预混 N_2O-C_2H_2	10	Appl Spectrosc,1971;25:660
	234.984	氩-氧-乙炔	5	Anal Chim Acta,1970;50:383
	234.984	氧-氢	2	Anal Chem,1966;38:1821
Au	267.595	预混氧-乙炔	7	Anal Chem,1967;39:466
	267.595	预混氧化亚氮-乙炔	0.5	Ж анал хим 1972;27:2327
	267.595	氧-氢	5	Beckman Bulletin,1959:753
B	249.678	预混氧-乙炔	30	Anal Chem,1967;39:466
	548	空气-乙炔	0.2μg	Anal Chem,1982;54(8):1321
	548	空气-乙炔	0.006	Analusis,1990;18(4):279
	546	空气-氢气	35ng	Ж анал хим,1989;44(8):1382
BO_2	518.07	预混 N_2O-C_2H_2	0.05	Appl Spectrosc,1971;25:660
Ba	455.403	预混氧-乙炔	0.03	Anal Chem,1967;39:466
	553.548	预混氧-乙炔	0.05	Anal Chem,1967;39:466
	553.548	预混氧化亚氮-乙炔	0.001	Spectrochimi Acta,1968;23B:673
	234.758	隔离氧化亚氮-乙炔	0.3	Talanta,1968;15:441
	553.548	隔离氧化亚氮-乙炔	0.05	Analyst,1969;94:554
	553.548	氧化亚氮-氢	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	553.548	隔离氧化亚氮-氢	0.02	Spectrosc Lett,1970;3:267
	553.548	N_2O-MAPP①	0.04	Spectrosc Lett,1970;3:267
	553.548	隔离 N_2O-MAPP①	0.03	Spectrosc Lett,1970;3:267

续表

元素	λ/nm	火　焰	检出限/(μg·ml⁻¹)	文　献
Ba	553.548	氧-氢	0.05	Analyst,1969;94:1969
	553.6		0.06	J Anal Chem,1993;347(3/4):107
	553.6		0.05	Anal Proc. 1991;28(2):40
	553.5	空气-乙炔	0.002	光谱实验室,1995;12(4):41
	553.6	空气-乙炔	0.83	分析试验室,1995;14(4):57
	455.4	空气-乙炔	0.04	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Be	234.861	预混氧-乙炔	1	Anal Chem 1967;39:466
	234.861	预混氧化亚氮-乙炔	1	Anal Chem 1971;43:611
	234.861	隔离的氧化亚氮-乙炔	0.1	Analyst,1968;93:522
	234.861	氧-氢	3	Anal Chem,1966;38:1821
Bi	223.061	预混氧-乙炔	40	Anal Chem,1967;39:466
	222.825	预混氧-乙炔	80	Anal Chem,1967;39:466
	306.772	预混氧-乙炔	700	Anal Chem,1967;39:466
	306.772	预混氧化亚氮-乙炔	2	Ж анал хим,1972;27:2327
	306.772	隔离氧化亚氮-乙炔	1.5	Spectrosc Lett,1970;3:267
	306.772	氧化亚氮-氢	200	Spectrosc Lett,1970;3:267
	306.772	隔离氮化亚氮-氢	200	Spectrosc Lett,1970;3:267
	306.772	N_2O-MAPP①	80	Spectrosc Lett,1970;3:267
	306.772	隔离 N_2O-MAPP①	40	Spectrosc Lett,1970;3:267
	223.061	氩-氧-乙炔	1	Anal Chim Acta. 1970;50:383
	223.061	氧-氢	1	Anal Chem,1966;38:1821
	223.061	空气-乙炔	3	Anal Chim Acta,1970;50:383
	306.772	氧-乙炔	20	Analyst,1969;94:554
Ca	393.367	预混氧-乙炔	0.005	Anal Chem,1967;39:466
	422.673	预混氧-乙炔	0.005	Anal Chem,1967;39:466
	422.673	隔离氧-乙炔	0.003	Analyst,1969;94:554
	422.673	预混氧化亚氮-乙炔	0.0001	Anal Chim Acta,1968;23B:673
	422.673	隔离氧化亚氮-乙炔	0.003	Spectrosc Lett,1970;3:267
	422.673	氧化亚氮-氢	0.002	Spectrosc Lett,1970;3:267
	442.673	隔离氧化亚氮-氢	0.001	Spectrosc Lett,1970;3:267
	422.673	N_2O-MAPP①	0.002	Spectrosc Lett,1970;3:267
	422.673	隔离 N_2O-MAPP①	0.001	Spectrosc Lett,1970;3:267
	422.673	氧-空气-乙炔	0.0005	Analyst,1969;94:1969
	422.7	空气-乙炔	0.12	分析试验室,1995;14(4):57
	422.7	空气-乙炔	0.69	Talanta,1990;37(1):89
	422.68	空气-乙炔	0.03	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Cd	228.802	预混氧-乙炔	6	Anal Chem,1967;39:466
	326.106	预混氧化亚氮-乙炔	0.8	Appl Spectrosc,1971;25:660
	326.106	隔离氧化亚氮-乙炔	5	Spectrosc Lett,1970;3:267
	326.106	隔离氧化亚氮-氢	7	Spectrosc Lett,1970;3:267
	326.106	N_2O-MAPP①	12	Spectrosc Lett,1970;3:267
	326.106	隔离 N_2O-MAPP①	12	Spectrosc Lett,1970;3:267
	326.106	氧-氢	0.5	Handbook of Chem. and phys,C. R. Co,1967
	228.802	氧-乙炔	6	Handbook of Chem. and phys,C. R. Co,1967
	326.106	氧-乙炔	30	Handbook of Chem. and phys,C. R. Co,1967
	228.802	空气-乙炔	0.5	Anal Chim Acta,1970;50:383
	228.802	氩-氧-乙炔	0.5	Anal Chim Acta,1970;50:383
	324.106	氩-氧-乙炔	0.2	Anal Chem,1966;38:1537
Ce	569.700	预混氧-乙炔	10	Anal Chem,1967;39:466
	569.923	预混氧-乙炔	10	Anal Chem,1967;39:466
	569.923	预混氧化亚氮-乙炔	10	Appl Spectrosc,1971;25:660
	520.2	N_2O-乙炔	10	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Co	345.350	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1967;39:466
	345.350	预混氧化亚氮-乙炔	0.03	Ж анал хим,1972;27:2327
	425.231	预混氧化亚氮-乙炔	0.005	Analyst,1969;94:1969
	352.685	隔离氧-乙炔	0.04	Analyst,1969;94:554
	352.685	隔离氧化亚氮-乙炔	0.2	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.685	氧化亚氮-氢	0.3	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.685	隔离氧化亚氮-氢	0.2	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.685	N_2O-MAPP①	0.3	Spectrosc Lett,1970;3:267

续表

元素	λ/nm	火 焰	检出限/($\mu g \cdot ml^{-1}$)	文 献
Co	352.685	隔离 N_2O-MAPP①	0.25	Spectrosc Lett,1970;3:267
	345.35	空气-乙炔	0.05	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Cr	357.869	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	359.349	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	360.533	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	425.435	预混氧化亚氮-乙炔	0.002	Spectrochimi Acta,1972;27B:391
	425.435	隔离氧-乙炔	0.007	Analyst,1969;94:554
	425.435	氧-空气-乙炔	0.005	Analyst,1969;94:1969
	425.435	预混氧化亚氮-乙炔	0.005	Analyst,1969;94:1969
	425.435	隔离氧化亚氮-乙炔	0.001	Spectrosc Lett,1970;3:267
	425.435	氧化亚氮-氢	0.07	Spectrosc Lett,1970;3:267
	425.435	隔离氧化亚氮-氢	0.04	Spectrosc Lett,1970;3:267
	425.435	N_2O-MAPP①	0.02	Spectrosc Lett,1970;3:267
	425.435	隔离氧化亚氮-MAPP①	0.007	Spectrosc Lett,1970;3:267
	425.44	空气-乙炔	0.04	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Cr(Ⅲ)		N_2O-乙炔	0.000025	Fresenius'J Anal Chem,1996;355(5/6):719
Cr(Ⅵ)		N_2O-乙炔	0.00002	Fresenius'J Anal Chem,1996;355(5/6):719
Cs	852.110	预混氧-乙炔	0.008	Anal Chem,1967;39:466
	455.536	预混氧-乙炔	8	Anal Chem,1967;39:466
	852.110	预混氧化亚氮-乙炔	0.00002	Ж анал хим,1972;27:2327
	455.536	预混氧化亚氮-乙炔	0.6	Anal Chem,1971;43:611
Cu	324.754	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	327.396	预混氧-乙炔	0.2	Anal Chem,1967;39:466
	327.396	预混氧化亚氮-乙炔	0.003	Ж анал хим,1972;27:2327
	324.754	预混氧化亚氮-乙炔	0.08	Appl Opt,1968;7:1325
	327.396	隔离氧-乙炔	0.04	Analyst,1969;94:554
	327.396	氧-空气-乙炔	0.1	Analyst,1969;94:1969
	327.396	隔离氧化亚氮-乙炔	0.03	Spectrosc Lett,1970;3:267
	327.396	氧化亚氮-氢	0.13	Spectrosc Lett,1970;3:267
	327.396	隔离氧化亚氮-氢	0.06	Spectrosc Lett,1970;3:267
	327.396	N_2O-MAPP①	0.09	Spectrosc Lett,1970;3:267
	327.396	隔离 N_2O-MAPP①	0.06	Spectrosc Lett,1970;3:267
	324.75	空气-乙炔	0.06	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Dy	418.678	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	421.178	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	404.599	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Ж анал хим,1972;27:2327
	404.599	氧-氢	0.4	Anal Chem,1971;43:611
	404.6	N_2O-乙炔	0.04	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Er	400.797	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	415.110	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1967;39:466
	400.797	预混氧化亚氮-乙炔	0.02	Anal Chem,1969;41:1494
	400.8	N_2O-乙炔	0.03	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Eu	459.403	预混氧-乙炔	0.003	Anal Chem,1967;39:466
	459.403	预混氧化亚氮-乙炔	0.0002	Spectrochimi Acta,1972;27B:391
	459.403	隔离氧化亚氮-乙炔	0.01	Spectrosc Lett,1970;3;267
	459.403	氧化亚氮-氢	0.1	Spectrosc Lett,1970;3:267
	459.403	隔离氧化亚氮-氢	0.06	Spectrosc Lett,1970;3;267
	459.403	N_2O-MAPP①	0.06	Spectrosc Lett,1970;3:267
	459.403	隔离 N_2O-MAPP	0.03	Spectrosc Lett,1970;3;267
	459.4		2	Anal Chim Acta,1991;254(1/2):21
	459.4	N_2O-乙炔	0.0001	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Fe	371.994	预混氧-乙炔	0.7	Anal Chem,1967;39:466
	371.994	预混氧化亚氮-乙炔	0.01	Ж анал хим,1972;27:2327
	371.994	隔离氧-乙炔	0.03	Appl Spectrosc,1971;25:660
	371.994	氧-空气-乙炔	0.2	Analyst,1969;94:1969
	371.994	隔离氧化亚氮-乙炔	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	371.994	氧化亚氮-氢	0.09	Spectrosc Lett,1970;3:267
	371.994	隔离氧化亚氮-氢	0.07	Spectrosc Lett,1970;3:267
	371.994	N_2O-MAPP①	0.12	Spectrosc Lett,1970;3:267
	371.994	隔离 N_2O-MAPP①	0.08	Spectrosc Lett,1970;3:267

续表

元素	λ/nm	火　焰	检出限/(μg·ml⁻¹)	文　献
Fe	371.994	氧-乙炔	0.5	Appl Spectrosc,1971;25:660
	371.99	空气-乙炔	0.04	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Ga	417.206	预混氧-乙炔	0.07	Anal Chem,1967;39:466
	417.206	预混氧化亚氮-乙炔	0.005	Ж анал хим,1972;27:2327
	417.206	隔离氧化亚氮-乙炔	0.08	Spectrosc Lett,1970;3:267
	417.206	氧化亚氮-氢	0.07	Spectrosc Lett,1970;3:267
	417.206	隔离氧化亚氮-氢	0.04	Spectrosc Lett,1970;3:267
	417.206	N_2O-MAPP①	0.07	Spectrosc Lett,1970;3:267
	417.206	隔离 N_2O-MAPP①	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	434		0.3	Chem Listy,1990;84(9):978
Gd	434.646	预混氧-乙炔	4	Anal Chem,1967;39:466
	451.996	预混氧-乙炔	2	Anal Chem,1967;39:466
	440.186	预混氧化亚氮-乙炔	1.0	Ж анал хим,1972;27:2327
	440.186	预混 N_2O-乙炔(乙醇)	1.0	Anal Chem,1969;41:1494
	434.65	N_2O-乙炔	0.3	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Ge	265.118	预混氧-乙炔	0.6	Anal Chem,1967;39:466
	265.118	预混氧化亚氮-乙炔	0.4	Appl Spectrosc,1971;25:660
	265.158	氩-氧-乙炔	3	Anal Chim Acta,1970;50:383
	265.118	隔离氧化亚氮-乙炔	1.3	Analyst,1970;95:425
	265.118	空气-乙炔	7	Anal Chim Acta,1970;50:383
Hg	253.652	预混氧-乙炔	40	Anal Chem,1967;39:466
	253.652	预混氧化亚氮-乙炔	10	Anal Chem,1971;43:611
	253.652	氢-氧-乙炔	1	Anal Chim Acta,1970;50:383
	253.652	氩-氧-乙炔	0.15	Anal Chem,1971;43:611
Ho	410.384	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	405.393	预混氧化亚氮-乙炔	0.02	Ж анал хим,1972;27:2327
	405.393	预混氧化亚氮-乙炔	0.01 (乙醇)	Anal Chem,1969;41:1494
	405.39		50	Anal Chim Acta,1991;254(1/2):21
	405.39	N_2O-乙炔	0.03	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
In	451.131	预混氧-乙炔	0.03	Anal Chem,1967;39:466
	451.131	预混氧化亚氮-乙炔	0.001	Ж анал хим,1972;27:2327
	451.131	氧化亚氮-乙炔	0.04	Spectrosc Lett,1970;3:267
	451.131	氧化亚氮-氢	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	451.131	隔离氧化亚氮-氢	0.03	Spectrosc Lett,1970;3:267
	451.131	N_2O-MAPP①	0.08	Spectrosc Lett,1970;3:267
	451.131	隔离 N_2O-MAPP①	0.07	Spectrosc Lett,1970;3:267
	451.131	氩-氢	0.005	Anal Chem,1966;38:1537
	451.13	N_2O-乙炔	0.5	Talanta,1982;29(12):1113
Ir	351.364	预混氧-乙炔	200	Anal Chem,1967;39:466
	380.012	预混氧-乙炔	100	Anal Chem,1967;39:466
	380.012	预混氧化亚氮-乙炔	3	Anal Chem,1971;43:611
	550.0 分子带	预混氧化亚氮-乙炔	0.4	Anal Chem,1971;43:611
K	766.491	预混氧-乙炔	0.003	Anal Chem,1967;39:466
	769.898	预混氧-乙炔	0.02	Anal Chem,1967;39:466
	766.491	预混氧化亚氮-乙炔	10^{-5}	Ж анал хим,1972;27:2327
			0.002	J Appl Spectrosc,1991;36(3):70
	769.9	空气-乙炔	0.08	H M Slationary Office,1981;18
			0.03	Chem Pap,1991;45(1):61
		空气-乙炔	0.008	化学通报,1991;(11):41
	766.5	空气-乙炔	0.01	分析试验室,1989;8(2):12
	766.5	空气-乙炔	0.0016	Ж анал хим,1990;45(3):589
La	579.134	预混氧化亚氮-乙炔	1	Ж анал хим,1972;27:2327
	550.134	预混氧化亚氮-乙炔	4	Anal Chem,1969;41:1494
	579.134	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1967;39:466
	441.8	N_2O-乙炔	0.8	Analyst,1993;118(2):193
LaO	441.82	N_2O-乙炔	0.06	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Li	323.263	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	610.364	预混氧-乙炔	0.001	Anal Chem,1967;39:466
	670.784	预混氧-乙炔	3×10^{-6}	Anal Chem,1967;39:466

续表

元素	λ/nm	火　焰	检出限/(μg·ml⁻¹)	文　献
Li	670.784	预混氧化亚氮-乙炔	1×10^{-6}	Ж анал хим,1972;27:2327
	323.263	预混氧化亚氮-乙炔	>10	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	460.286	预混氧化亚氮-乙炔	>10	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	610.364	预混氧化亚氮-乙炔	0.1	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	670.784	氧-乙炔	0.05	Analyst,1969;94:1969
	670.8	空气-丁烷-丙烷	0.05	Khim Prom-st,1979;(3):5
		空气-乙炔	0.097	Analyst,1992;117(8):1373
		空气-乙炔	0.002	化学通报,1991;(11):41
	670.8	空气-乙炔	0.005	分析试验室,1989;8(2):12
	670.8	空气-乙炔	0.0002	Ж анал хим,1990;45(3):589
			0.0013	Analyst,1985;110(6):69
	670.8	空气-乙炔	0.91	Talanta,1990;37(1):89
Lu	331.211	预混氧-乙炔	0.2	Anal Chem,1967;39:466
	451.857	预混氧化亚氮-乙炔	0.4	Anal Chem,1969;41:1494
	451.86	N_2O-乙炔	2	Fresenius' Z Anal Chem,1989;335(8):887
Mg	285.213	预混氧-乙炔	0.2	Anal Chem,1967;39:466
	285.213	预混氧化亚氮-乙炔	0.005	Spectrochim Acta,1968;23B:673
	285.213	隔离氧化亚氮-乙炔	0.3	Analyst,1969;94:554
	285.213	氧-空气-乙炔	0.05	Analyst,1969;94:1969
	285.213	隔离氧化亚氮-乙炔	0.001	Spectrosc Lett,1970;3:267
	285.213	氧化亚氮-氢	0.08	Spectrosc Lett,1970;3:267
	285.213	隔离氧化亚氮-氢	0.07	Spectrosc Lett,1970;3:267
	285.213	N_2O-MAPP①	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	285.213	隔离 N_2O-MAPP①	0.04	Spectrosc Lett,1970;3:267
	285.213	氧-乙炔	0.2	Analyst,1969;94:1969
	285.22	空气-乙炔	0.07	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
MgOH	370.2	氩-氢	0.02	Anal Chem,1966;38:1537
Mn	403.076	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	403.076	预混氧化亚氮-乙炔	0.001	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	403.307	预混氧化亚氮-乙炔	0.008	Appl Spectrosc,1971;25:660
	403.307	隔离氧化亚氮-乙炔	0.005	Spectrosc Lett,1970;3:267
	403.307	氧化亚氮-氢	0.01	Spectrosc Lett,1970;3:267
	403.307	隔离氧化亚氮-氢	0.004	Spectrosc Lett,1970;3:267
	403.307	N_2O-MAPP①	0.03	Spectrosc Lett,1970;3:267
	403.3	空气-乙炔	0.02	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
	403.307	隔离 N_2O-MAPP①	0.02	Spectrosc Lett,1970;3:267
	403.2	氩-氢	0.01	Anal Chem,1966;38:1537
	403.307	氧-氢	0.01	Beckman Bulletin,1959;753
	403.307	氧-乙炔	0.1	Analyst,1969;94:1969
Mo	379.825	预混氧-乙炔	0.03	Anal Chem,1967;39:466
	390.296	预混氧化亚氮-乙炔	0.01	Ж анал хим,1972;27:2327
	379.825	隔离氧化亚氮-乙炔	0.3	Spectrosc Lett,1970;3:267
	379.825	氧化亚氮-氢	19.0	Spectrosc Lett,1970;3:267
	379.825	隔离氧化亚氮-氢	12.0	Spectrosc Lett,1970;3:267
	379.825	N_2O-MAPP①	9	Spectrosc Lett,1970;3:267
	379.825	隔离 N_2O-MAPP①	8	Spectrosc Lett,1970;3:267
	390.296	隔离氧化亚氮-乙炔	0.2	Talanta,1968;15:441
	317.035	隔离氧化亚氮-乙炔	0.5	Appl Opt,1968;7:1305
	315.816	隔离氧化亚氮-乙炔	1.5	Appl Opt,1968;7:1305
	313.259	隔离氧化亚氮-乙炔	0.5	Appl Opt,1968;7:1305
	319.397	隔离氧化亚氮-乙炔	0.3	Talanta,1969;16:245
	379.825	空气-乙炔	80	Anal Chim Acta,1970;50:383
Na	330.237	预混氧-乙炔	5×10^{-4}	Anal Chem,1967;39:466
	588.995	预混氧-乙炔	1×10^{-4}	Anal Chem,1967;39:466
	589.592	预混氧-乙炔	2×10^{-4}	Anal Chem,1967;39:466
	588.995	预混氧化亚氮-乙炔	10^{-5}	Ж анал хим,1972;27:2327
	588.995 589.592	空气-氢 空气-氢	}10^{-4}	Beckman Bulletin,1959;753
	589.6	空气-乙炔	0.4	Talanta,1990;37(1):89
	589.0	空气-乙炔	0.001	Ж анал хим,1990;45(3):589

续表

元素	λ/nm	火 焰	检出限/($\mu g \cdot ml^{-1}$)	文 献
Na	589.0	空气-乙炔	0.025	分析试验室,1989;8(2):12
		空气-乙炔	0.002	化学通报,1991;(11):41
			0.01	Chem Pap,1991;45(1):61
	330.2	空气-乙炔	0.03	H M Slationary Office,1981:68
Nb	405.894	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1967;39:466
	405.894	氧化亚氮-乙炔	0.5	Talanta,1969;16:245
	405.894	隔离氧化亚氮-乙炔	0.06	Talanta,1969;16:245
			0.3	At Spectrosc,1985;6(2):53
Nd	488.381	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1964;36:1287
	492.453	预混氧-乙炔	2	Anal Chem,1967;39:466
	492.453	预混氧化亚氮-乙炔	0.2	Anal Chem,1969;41:1494
	494		0.2	Chem Listy,1990;84(9):978
			0.17	At Spectrosc,1990;11(3):90
	494.48	N_2O-乙炔	0.15	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Ni	341.476	预混氧-乙炔	1.0	Anal Chem,1967;39:466
	352.454	预混氧-乙炔	0.6	Anal Chem,1967;39:466
	341.476	预混氧化亚氮-乙炔	0.01	Ж анал хим,1972;27:2327
	352.454	预混氧化亚氮-乙炔	0.02	Appl Spectrosc,1971;25:660
	352.454	隔离氧化亚氮-乙炔	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.454	氧化亚氮-氢	0.08	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.454	隔离氧化亚氮-氢	0.06	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.454	N_2O-MAPP①	0.2	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.454	隔离 N_2O-MAPP①	0.1	Spectrosc Lett,1970;3:267
	352.454	氩-氢	0.02	Anal Chem,1966;38:1537
	352.454	氧-氢	0.3	Beckman Bulletin,1959:753
	341.476	空气-氢	0.12	Symposium on spectroscopy,ASTM,1960
	352.45	空气-乙炔	0.07	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Os	442.047	预混氧-乙炔	10	Anal Chem,1967;39:466
	442.047	预混氧化亚氮-乙炔	2	Appl Spectrosc,1971;25:660
P	526		5ng	日本化学会志,1990;1(1):38
Pb	368.348	预混氧-乙炔	3	Anal Chem,1967;39:466
	405.783	预混氧化亚氮-乙炔	0.1	Appl Spectrosc,1971;25:660
	368.348	预混氧化亚氮-乙炔	0.0002	Analyst,1969;94:1969
	405.78	空气-乙炔	0.2	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
	261.418	氩-氧-乙炔	1	Anal Chim Acta,1970;50:383
	405.783	隔离氧-乙炔	0.5	Analyst,1969;94:554
	405.783	氧-空气-乙炔	2	Analyst,1969;94:554
	368.348	氧-乙炔	3	Analyst,1969;94:1969
	405.783	氧-乙炔	10	Analyst,1969;94:554
	405.783	隔离氧化亚氮-乙炔	0.4	Spectrosc Lett,1970;3:267
	405.783	氧化亚氮-氢	1.0	Spectrosc Lett,1970;3:267
	405.783	隔离氧化亚氮-乙炔	0.8	Spectrosc Lett,1970;3:267
	405.783	N_2O-MAPP①	0.8	Spectrosc Lett,1970;3:267
	405.783	隔离 N_2O-MAPP①	0.7	Spectrosc Lett,1970;3:267
Pd	363.470	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1967;39:466
	363.470	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Ж анал хим,1972;27:2327
	363.470	预混氧化亚氮-乙炔	0.04	Spectrosc Lett,1970;3:267
	363.470	隔离氧化亚氮-氢	0.04	Anal Chim Acta,1970;52:259
	340.470	隔离氧化亚氮-氢	0.09	Anal Chim Acta,1970;52:259
	360.955	隔离氧化亚氮-氢	0.18	Anal Chim Acta,1970;52:259
	324.270	隔离氧化亚氮-氢	2.0	Anal Chim Acta,1970;52:259
	342.124	隔离氧化亚氮-氢	0.70	Anal Chim Acta,1970;52:259
	351.694	隔离氧化亚氮-氢	0.70	Anal Chim Acta,1970;52:259
	346.077	隔离氧化亚氮-氢	1.5	Anal Chim Acta,1970;52:259
	348.115	隔离氧化亚氮-氢	5.0	Anal Chim Acta,1970;52:259
	355.308	隔离氧化亚氮-氢	1.5	Anal Chim Acta,1970;52:259
	344.791	隔离氧化亚氮-氢	2	Anal Chim Acta,1970;52:259
	363.470	氧化亚氮-氢	0.13	Spectrosc Lett,1970;3:267
	363.470	N_2O-MAPP①	0.08	Spectrosc Lett,1970;3:267
	363.470	隔离 N_2O-MAPP	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267

续表

元素	λ/nm	火 焰	检出限/(μg·ml⁻¹)	文 献
Pr	493.974	预混氧-乙炔	2	Anal Chem,1967;39:466
	493.974	预混氧化亚氮-乙炔	0.5	Ж анал хим,1972;27:2327
	495.136	预混氧化亚氮-乙炔	0.5	Anal Chem,1969;41:1494
	495.14	N_2O-乙炔	0.3	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
	495		0.3	Chem Listy,1990;84(9):978
Pt	265.945	预混氧-乙炔	40	Anal Chem,1967;39:466
	265.945	预混氧化氮-乙炔	2	Spectrochim Acta,1968;23B:235
	306.471	隔离氧-乙炔	2	Analyst,1969;94:554
Rb	780.023	预混氧-乙炔	0.002	Anal Chem,1967;39:466
	798.1	预混氧化亚氮-乙炔	2×10^{-5}	Ж анал хим,1972;27:2327
	780.023	预混氧化亚氮-乙炔	0.008	Anal Chem,1971;43:611
	794.760	预混氧化亚氮-乙炔	3	Anal Chem,1971;43:611
			0.19	Analyst,1985;110(6):69
Re	346.046	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1967;39:466
	346.473	预混氧-乙炔	4	Analyst,1971;96:631
	345.188	预混氧化亚氮-乙炔	4	Analyst,1971;96:631
	488.914	预混氧化亚氮-乙炔	1.5	Analyst,1971;96:631
	577.683	预混氧化亚氮-乙炔	4	Analyst,1971;96:631
	346.046	预混氧化亚氮-乙炔	0.2	Spectrochim Acta,1968;23B:235
Rh	369.236	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	369.236	预混氧化亚氮-乙炔	0.03	Appl Spectrosc,1771;25:660
	369.236	隔离氧化亚氮-乙炔	0.01	Spectrosc Lett,1970;3:267
	369.236	氧化亚氮-氢	0.03	Spectrosc Lett,1970;3:267
	369.236	隔离氧化亚氮-氢	0.01	Spectrosc Lett,1970;3:267
	369.236	N_2O-MAPP①	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	369.236	隔离 N_2O-MAPP①	0.04	Spectrosc Lett,1970;3:267
Ru	372.803	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	372.803	预混氧化亚氮-乙炔	0.3	Anal Chem,1971;43:611
	372.803	氧-氢	0.5	Beckman Bulletin,1959:753
S		N_2O-乙炔	1	Mikrochim Acta,1982;1(3-4):271
	384		0.2μg	日本化学会志,1990;1(1):38
Sb	259.805	预混氧-乙炔	20	Anal Chem,1967;39:465
	252.852	预混氧化亚氮-乙炔	0.6	Anal Chem,1971;43:611
	259.805	氧-氢	0.2	Anal Chem,1966;38:1821
	231.147	氧-乙炔-氢	1	Anal Chim Acta,1970;50:383
	231.147	空气-乙炔	3	Anal Chim Acta,1970;50:383
Sc	390.749	预混氧-乙炔	0.2	Anal Chem,1967;39:466
	391.181	预混氧-乙炔	0.07	Anal Chem,1967;39:466
	402.040	预混氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1967;39:466
	402.040	预混氧化亚氮-乙炔	0.03	Spectrochim Acta,1968;23B:235
	390.749	预混氧化亚氮-乙炔	0.03	Anal Chem,1969;41:1494
	391.181	预混氧化亚氮-乙炔	0.01	Anal Chem,1969;41:1494
	402.040	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Anal Chem,1969;41:1494
	390.749	氧-乙炔	2	Anal Chem,1964;36:1287
	391.18	N_2O-乙炔	0.01	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Se	196.026	预混氧化亚氮-乙炔	100	Anal Chem,1971;43:611
	203.985	氧-氢	3	Anal Chem,1966,38:1821
	203.985	空气-乙炔	50	Anal Chim Acta,1970;50:383
	203.985	氩-氧-乙炔	25	Anal Chim Acta,1970;50:383
Si	251.611	预混氧-乙炔	7	Anal Chem,1967;39:466
	251.611	预混氧化亚氮-乙炔	3	Appl Spectrosc,1971;25:660
	251.611	隔离氧化亚氮-乙炔	6	Anal Chim Acta,1969;47:407
	251.611	氧-氢	8	Anal Chem,1966;38:1821
Sm	488.377	预混氧-乙炔	0.6	Anal Chem,1967;39:466
	488.397	预混氧-乙炔		
	517.542	预混氧-乙炔	0.8	Anal Chem,1964;36:1287
	476.027	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Ж анал хим,1972;27:2327
	476.027	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Anal Chem,1969;41:1494
	478.310	预混氧化亚氮-乙炔	0.06	Anal Chem,1969;41:1494
	488.377	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Anal Chem,1969;41:1494

续表

元素	λ/nm	火　焰	检出限/(μg·ml⁻¹)	文　献
Sm	488.397	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Anal Chem,1969;41:1494
	478.31	N_2O-乙炔	0.03	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
	478		0.03	Chem Listy,1990;84(9):978
Sn	303.412	预混氧-乙炔	9	Anal Chem,1967;39:466
	383.999	预混氧化亚氮-乙炔	0.1	Appe Spectrosc,1971;25:660
	235.485	氢-氧-乙炔	1	Anal Chim Acta,1970;50:383
	283.999	隔离氧化亚氮-乙炔	0.8	Spectrosc Lett,1970;3:267
	283.999	氧化亚氮-氢	250	Spectrosc Lett,1970;3:267
	283.999	隔离氧化亚氮-氢	100	Spectrosc Lett,1970;3:267
	283.999	N_2O-MAPP①	14	Spectrosc Lett,1970;3:267
	242.949	氧-氢	0.5	Anal Chem,1966;38:1821
	255.485	空气-乙炔	2	Anal Chim Acta,1970;50:383
Sr	460.733	预混氧-乙炔	0.004	Anal Chem,1967;39:466
	460.733	预混氧化亚氮-乙炔	0.0001	Spectrochim Acta,1968;23B:673
	460.733	隔离氧-乙炔	0.002	Analyst,1969;94:554
	460.733	氧-氢	0.001	Anal Chem,1966;38:1537
	460.733	隔离氧化亚氮-乙炔	0.02	Spectrosc Lett,1970;3:267
	460.733	氧化亚氮-氢	0.009	Spectrosc Lett,1970;3:267
	460.733	隔离氧化亚氮-氢	0.007	Spectrosc Lett,1970;3:267
	460.733	N_2O-MAPP①	0.05	Spectrosc Lett,1970;3:267
	460.733	隔离 N_2O-MAPP①	0.02	Spectrosc Lett,1970;3:267
	460.7	空气-乙炔	5ng	Zavod Lab,1981;47(11):40
			0.21	Analyst,1985;110(6):69
	460.7	空气-乙炔	6.4	Talanta,1990;37(1):89
	460.73	空气-乙炔	0.003	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
Ta	481.275	预混氧-乙炔	18	Anal Chem,1967;39:466
	474.016	预混氧化亚氮-乙炔	4	Appl Spectrosc,1971;25:660
			0.6	At Spectrosc,1985;6(2):53
Tb	390.135	预混氧-乙炔	4	Anal Chem,1967;39:466
	432.647	预混氧-乙炔	1	Anal Chem,1967;39:466
	431.885	预混氧化亚氮-乙炔	0.2	Anal Chem,1969;41:1494
	432.647	预混氧化亚氮-乙炔	0.4	Anal Chem,1969;41:1494
	432.65	N_2O-乙炔	0.5	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Te	238.325	预混氧-乙炔	200	Anal Chem,1967;39:466
	238.576	预混氧-乙炔	600	Anal Chem,1967;39:466
	486.62	预混氧化亚氮-乙炔	2	Anal Chem,1971;43:611
	214.275	氧-氢	0.6	Anal Chem,1966;38:1821
	214.275	空气-乙炔	5	Anal Chim Acta,1970;50:383
Ti	365.350	预混氧-乙炔	0.5	Anal Chem,1967;39:466
	399.864	预混氧-乙炔	0.5	Anal Chem,1967;39:466
	365.350	预混氧化亚氮-乙炔	0.03	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	399.864	隔离氧化亚氮-乙炔	0.5	Talanta,1968;15:441
	365.350	隔离氧化亚氮-乙炔	1	Talanta,1968;15:441
	365.350	氧-氢	2	Anal Chem,1966;38:1821
	399.864	氧-乙炔	5	Spectrochim Acta,1963;19:1187
			0.3	At Spectrosc,1985;6(2):53
Th	576.055	预混氧-乙炔	150	Anal Chem,1967;39:466
	491.982	预混氧化亚氮-乙炔	10	Anal Chem,1971;43:611
Tl	377.572	预混氧-乙炔	0.09	Anal Chem,1967;39:466
	535.046	预混氧化亚氮-乙炔	0.002	Ж анал хим 1972;27:2327
	377.572	预混氧化亚氮-乙炔	0.05	Spectrochimi Acta,1968;23B:235
Tm	409.419	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	410.584	预混氧-乙炔	0.2	Anal Chem,1967;39:466
	371.790	预混氧化亚氮-乙炔	0.08	Appl Spectrosc,1971;25:660
	371.790	预混氧化亚氮-乙炔	0.01	Anal Chem,1969;41:1494
	371.790	预混氧化亚氮-乙炔	0.004	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	409.419	氧-氢	0.4	Anal Chem,1966;38:1821
	409.418	氧-乙炔	0.5	Anal Chem,1964;36:1287
	371.79	N_2O-乙炔	0.04	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887

续表

元素	λ/nm	火焰	检出限/(μg·ml⁻¹)	文献
U	591.540	预混氧-乙炔	10	Anal Chem,1967;39:466
	5448	预混氧化亚氮-乙炔	5	Anal Chem,1971;43:611
		N_2O-乙炔	5	Fresenius'Z Anal Chem,1980;303(1):29
V	437.924	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	440.820 } 440.851 }	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	437.924	预混氧化亚氮-乙炔	0.007	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	318.341	隔离氧化亚氮-乙炔	0.2	Talanta,1968;15:441
	437.924	隔离氧化亚氮-乙炔	0.5	Talanta,1968;15:441
	318.540	隔离氧化亚氮-乙炔	0.2	Spectrosc Lett,1970;3:267
	318.540	氧化亚氮-氢	125	Spectrosc Lett,1970;3:267
	318.540	隔离氧化亚氮-氢	100	Spectrosc Lett,1970;3:267
	318.540	隔离 N_2O-MAPP①	400	Spectrosc Lett,1970;3:267
	318.398	氩-氧-乙炔	25	Anal Chim Acta,1970;50:383
	411.178	氧-氢	2	Anal Chem,1966;38:1821
	437.924	空气-乙炔	0.3	Spectrochim Acta,1963;19:1187
	437.92	空气-乙炔	0.3	Appl Spectrosc,1981;35(5):497
W	400.875	预混氧-乙炔	4	Anal Chem,1967;39:466
	400.875	预混氧化亚氮-乙炔	0.5	Spectrochim Acta,1968;23B:235
	400.875	空气-乙炔	90	Spectrochim Acta,1963;19:1187
Y	407.738	预混氧-乙炔	0.3	Anal Chem,1967;39:466
	410.238	预混氧-乙炔	0.	Anal Chem,1967;39:466
	412.831	预混氧-乙炔	0.5	Anal Chem,1967;39:466
	362.094	预混氧化亚氮-乙炔	0.04	Anal Chem,1969;41:1494
	362.094	预混氧化亚氮-乙炔	0.1	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	410.238	氧-氢	2	Anal Chem,1966;38:1821
	362.09	N_2O-乙炔	0.12	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Yb	398.798	预混氧-乙炔	0.05	Anal Chem,1967;39:466
	398.798	预混氧化亚氮-乙炔	0.001	Ж анал хим,1972;27:2327
	398.798	预混氧化亚氮-乙炔	3×10^{-4} (乙醇)	Anal Chem,1969;41:1494
	398.798	预混氧化亚氮-乙炔	2×10^{-4}	Spectrochim Acta,1972;27B:391
	398.798	氧-氢	0.001	Anal Chem,1966;38:1821
	398.798	氧-乙炔	0.1	Anal Chem,1964;36:1287
	398.8		5	Anal Chim Acta,1991;254(1/2):21
	398.8	N_2O-乙炔	0.0008	Fresenius'Z Anal Chem,1989;335(8):887
Zn	213.856	预混氧-乙炔	50	Anal Chem,1967;39:466
	481.053	预混氧-乙炔	1500	Anal Chem,1967;39:466
	213.856	预混氧化亚氮-乙炔	10	Anal Chem,1971;43:611
	213.856	氩-氧-乙炔	1	Anal Chim Acta,1970;50:383
	213.856	空气-乙炔	7	R. Mavrodineanu,"flame Spectrosc.",1965
Zr	351.960	预混氧-乙炔	50	Anal Chem,1967;39:466
	360.119	预混氧-乙炔	75	Anal Chem,1967;39:466
	360.119	预混氧化亚氮-乙炔	3	Spectrochim Acta,1968;23B:235
	351.960	隔离氧化亚氮-乙炔	1.2	Talanta,1969;16:245

① MAPP 甲基乙炔-丙二烯-丙烯。

表 5-4 分析线及其光谱数据
（按元素符号次序排列）

元素	λ/nm	能级 E_i/cm⁻¹	能级 E_j/cm⁻¹	统计权重 g_j	跃迁几率/($10^8\cdot s^{-1}$)	跃迁几率最优值/%
Ag	328.068	0	50473	4	1.57	<10
	338.289	0	29552	4	0.32	>50
Al	308.215	0	32435	4	0.61	<25
	309.271	112	32437	6	0.73	<25
	309.284	112	32435	4	0.12	<50
	394.401	0	25348	2	0.493	<25
	396.152	112	25348	2	0.98	<25

续表

元素	λ/nm	能级		统计权重	跃迁几率/	跃迁几率最优
		E_i/cm^{-1}	E_j/cm^{-1}	g_j	$(10^8 \cdot s^{-1})$	值/%
As	193.696	0	51610	4	44.0	>50
	197.197	0	50694	2	100	>50
	228.812	10915	54605	4	26.0	>50
	234.984	10592	60835	4	20.0	>50
	249.291	10592	50694	2	4.95	>50
	274.500	18186	54605	4	4.75	>50
	278.022	18648	54605	4	15.0	>50
	286.044	18186	53136	2	16.5	>50
Au	267.595	0	37359	2	1.77	<10
B	249.677	0	40040	2	1.20	<50
	249.772	15	40040	2	2.40	<50
Ba	350.111	0	28554	3	0.29	<50
	455.403	0	21952	4	1.19	<10
	493.409	0	20262	2	0.955	<10
	553.548	0	18080	3	1.15	<10
Be	234.861	0	42565	3	5.47	<25
Bi	222.825	0	44865	4	0.38	>50
	223.061	0	44817	6	1.25	>50
	227.658	0	43912	4	0.31	>50
	306.772	0	32588	2	3.50	>50
	472.219	11418	32588	2	0.090	>50
Ca	393.366	0	25414	4	1.50	<25
	396.847	0	25192	2	1.46	<25
	422.673	0	23652	3	2.18	10
Co	340.512	3483	32842	10	1.50	>50
	341.234	4143	33440	10	1.10	>50
	341.263	0	29295	8	0.14	>50
	343.304	5076	34196	4	2.28	>50
	344.364	4143	33173	8	1.62	>50
	344.944	3483	32465	10	0.26	>50
	345.350	3483	32431	10	2.60	>50
	346.580	0	28845	12	0.19	>50
	347.402	0	28777	8	0.45	>50
	350.228	3483	32028	8	1.38	>50
	350.632	4143	32554	6	1.57	>50
	351.264	4690	33151	4	1.85	>50
	351.348	816	29270	10	0.20	>50
	352.685	0	28346	10	0.26	>50
	356.938	7442	35451	8	3.25	>50
	357.536	816	28777	8	0.15	>50
	359.487	1407	29216	6	0.17	>50
	384.547	7442	33440	10	0.88	>50
	387.312	3843	29295	8	0.28	>50
	389.408	8461	34134	8	1.50	>50
	399.531	7442	32465	10	0.60	>50
	412.132	7442	31700	10	0.37	>50
	425.231	816	24326	8	0.0008	>50
Cr	357.869	0	27935	9	0.92	>50
	359.349	0	27820	7	1.00	>50
	360.533	0	27650	9	0.58	>50
	425.435	0	23499	9	0.22	>50
	427.480	0	23386	7	0.21	>50
	428.972	0	23305	5	0.19	>50
	520.604	7593	26796	5	0.50	>50
Cs	455.536	0	21947	4	0.35	>50
	459.318	0	21766	2	0.32	>50
	852.110	0	11732	4	0.32	>50
	894.350	0	11178	2	0.24	>50
Cu	324.754	0	30784	4	0.948	<10
	327.396	0	30535	2	0.95	>50

续表

元素	λ/nm	能级 E_i/cm^{-1}	能级 E_j/cm^{-1}	统计权重 g_j	跃迁几率/($10^8\cdot s^{-1}$)	跃迁几率最优值/%
Cu	510.554	11203	30784	4	0.013	>50
Fe	302.049	704	33802	5	0.28	>50
	302.064	0	33096	9	0.60	>50
	302.107	416	33507	7	0.67	>50
	344.061	0	29056	7	0.29	>50
	358.120	6928	34844	13	1.59	>50
	371.994	0	26875	11	0.138	<10
	373.713	416	27167	9	0.17	>50
	374.590	978	27666	3	0.12	>50
	382.588	7377	33507	7	1.18	>50
	385.991	0	25900	9	0.13	>50
	387.858	704	26479	3	0.10	>50
	388.628	416	26140	7	0.072	>50
	389.971	704	26340	5	0.042	>50
	393.030	704	26140	7	0.030	>50
	438.355	11976	34782	11	1.02	>50
	526.954	6928	25900	9	0.012	>50
	532.804	7377	26140	7	0.012	>50
Ga	294.418	826	34782	4	0.45	>50
	403.298	0	24788	6	0.122	<10
	417.206	826	24788	8	0.33	>50
Ge	259.254	557	39118	5	2.20	>50
	265.118	1410	39118	5	5.20	>50
	265.158	0	37702	3	2.67	>50
	269.134	557	37702	3	2.43	>50
	270.943	557	37452	1	12.0	>50
	275.459	1410	37702	3	3.27	>50
Hf	368.224	0	27150	5	0.15	>50
Hg	253.652	0	39412	3	1.17	>50
In	303.936	0	32892	4	1.78	>50
	325.609	2213	32916	6	2.00	>50
	410.176	0	24373	2	0.396	<25
	451.131	2213	24373	2	1.10	>50
Ir	351.364	0	28452	12	0.082	>50
	380.012	0	26308	10	0.059	>50
K	404.415	0	24720	4	0.0142	<25
	766.491	0	13043	4	0.387	<10
	769.898	0	12985	2	0.382	<10
La	357.443	0	27969	4	0.65	>50
	392.756	0	25454	2	0.40	>50
	403.721	0	24763	4	0.15	>50
	406.032	4122	28743	12	0.24	>50
	406.479	3495	28089	10	0.17	>50
	407.918	0	24508	6	0.080	>50
	408.961	3010	27455	8	0.20	>50
	410.487	2568	270.23	6	0.15	>50
	413.704	1053	25218	6	0.090	>50
	418.732	0	23875	6	0.16	>50
	428.027	1053	24410	8	0.15	>50
	456.791	3495	25380	8	0.11	>50
	457.002	4122	25997	10	0.14	>50
	494.977	0	20197	2	0.20	>50
	514.542	3010	22439	4	0.24	>50
	517.731	3495	22804	6	0.23	>50
	521.186	4122	23303	8	0.25	>50
	523.427	4122	23221	8	0.18	>50
	525.346	1053	20083	4	0.10	>50
	527.119	1053	20019	4	0.10	>50
	550.134	0	18172	4	0.080	>50
Li	323.263	0	39025	6	0.117	<10

续表

元素	λ/nm	能级		统计权重 g_j	跃迁几率/($10^8 \cdot s^{-1}$)	跃迁几率最优值/%
		E_i/cm^{-1}	E_j/cm^{-1}			
Li	460.286	14904	36623	10	0.230	<10
	610.364	14904	31283	10	0.716	10
	670.780	0	14904	6	0.372	<3
Mg	285.213	0	35051	3	4.95	<3
	517.268	21870	41197	3	0.346	<3
Mn	279.482	0	35770	8	1.04	>50
	279.827	0	35726	6	1.12	>50
	280.106	0	35690	4	1.22	>50
	403.076	0	24802	8	0.176	<10
	403.307	0	24788	6	0.16	>50
	403.449	0	24779	4	0.14	>50
Mo	313.259	0	31913	9	1.09	>50
	315.816	0	31655	7	0.54	>50
	317.035	0	31533	7	0.77	>50
	319.397	0	31300	5	0.88	>50
	320.883	0	31155	5	0.34	>50
	379.825	0	26321	9	0.49	>50
	390.296	0	25624	5	0.42	>50
Na	330.237	0	30273	4	0.0290	<25
	330.298	0	30267	2	0.0293	<25
	588.995	0	16973	4	0.628	<3
	589.592	0	16956	2	0.630	<3
	819.482	16973	29173	6	0.945	<25
Nb	353.530	0	28278	4	0.50	>50
	358.027	1050	28973	8	0.78	>50
	369.785	392	27427	8	0.14	>50
	371.301	1050	27975	10	0.27	>50
	373.980	695	27427	8	0.24	>50
	374.239	0	26713	4	0.25	>50
	378.706	154	26552	2	0.50	>50
	379.015	1050	27427	8	0.12	>50
	379.121	1050	27420	10	0.25	>50
	379.812	392	26713	4	0.40	>50
	380.292	695	26983	6	0.28	>50
	405.894	1050	25680	12	0.65	>50
	407.973	695	25200	10	0.49	>50
	410.092	392	24770	8	0.31	>50
	411.040	392	24773	6	0.028	>50
	412.381	154	24397	6	0.30	>50
	413.710	0	24165	4	0.18	>50
	413.971	1050	25200	6	0.18	>50
	415.258	695	24770	8	0.21	>50
	416.366	154	24165	4	0.35	>50
	416.466	392	24397	6	0.23	>50
	416.813	0	23985	2	0.55	>50
Ni	300.249	205	33501	7	0.96	>50
	336.957	0	29669	7	0.30	>50
	338.057	3410	32982	3	2.03	>50
	341.476	205	30913	3	1.90	>50
	343.356	205	29321	7	0.26	>50
	344.626	880	29888	5	0.76	>50
	347.254	880	29669	7	0.17	>50
	349.296	880	29501	3	1.30	>50
	351.034	1713	30192	1	2.30	>50
	351.505	880	29321	7	0.64	>50
	352.454	205	28569	5	0.92	>50
	356.637	3410	31442	5	1.28	>50
	361.046	880	28569	5	0.[illegible]5	>50
	361.939	3410	31031	7	1.07	>50
	385.830	3410	29321	7	0.16	>50

续表

元 素	λ/nm	能级		统计权重 g_j	跃迁几率/ $(10^8 \cdot s^{-1})$	跃迁几率最优值/%
		E_i/cm^{-1}	E_j/cm^{-1}			
Os	290.906	0	34365	11	1.00	>50
	301.804	0	33124	7	0.61	>50
	305.866	0	32685	9	0.82	>50
	330.156	0	30280	11	0.33	>50
	442.047	0	22616	9	0.034	>50
Pb	216.999	0	46069	3	4.5	>50
	261.365	7819	46069	3	0.63	>50
	261.418	7819	46061	5	5.20	>50
	283.306	0	35287	3	0.609	<10
	363.958	7819	35287	3	0.43	>50
	368.348	7819	34960	1	3.10	>50
	405.783	10650	35287	3	3.07	>50
Pd	244.791	0	40839	3	0.28	>50
	340.458	6564	35928	9	1.33	>50
	342.124	7755	36976	5	1.68	>50
	346.077	6564	35451	7	0.47	>50
	348.115	10094	38812	5	2.2	>50
	351.694	7755	36181	3	2.13	>50
	355.308	11722	39858	7	2.6	>50
	360.955	7755	35451	7	1.29	>50
	363.470	6564	34069	5	1.24	>50
Pt	265.945	0	37591	[illegible]	0.91	>50
	306.471	0	32620	5	0.52	>50
Rb	420.185	0	23793	4	0.24	>50
	421.556	0	23715	2	0.24	>50
	780.023	0	12817	4	0.75	>50
Re	345.188	0	28962	4	0.50	>50
	346.473	0	28854	6	0.82	>50
	488.914	0	20448	8	0.005	>50
	527.556	0	18950	[illegible]	0.003	>50
	577.683	11584	28890	8	0.003	>50
Rh	332.309	1530	31614	10	0.41	>50
	339.685	0	29431	10	0.31	>50
	343.489	0	29105	12	0.34	>50
	350.252	0	28543	10	0.26	>50
	358.310	1530	29431	10	0.27	>50
	359.619	2598	30397	4	0.88	>50
	365.799	1530	28860	6	0.68	>50
	369.236	0	27075	8	0.35	>50
	370.091	1530	28543	10	0.35	>50
	385.652	5691	31614	10	0.67	>50
	421.114	5691	29431	10	0.22	>50
	437.480	5691	28543	10	0.23	>50
Ru	287.498	0	34773	11	0.61	>50
	312.831	0	30348	[illegible]	0.46	>50
	343.674	1191	30280	11	0.67	>50
	349.894	0	28572	13	0.46	>50
	359.302	213	30537	7	1.27	>50
	366.135	1191	28495	11	0.40	>50
	372.803	0	26816	11	0.42	>50
	379.935	0	26313	9	0.32	>50
Sb	206.833	0	48332	6	42.0	>50
	217.581	0	45945	4	13.8	>50
	231.147	0	43249	2	3.75	>50
	252.852	9854	49391	4	14.0	>50
	259.805	8512	46991	2	32.0	>50
Sc	326.991	0	30573	2	4.55	>50
	327.363	168	30707	6	2.00	>50
	390.749	0	25585	6	2.00	>50
	391.181	168	25725	8	1.88	>50

续表

元 素	λ/nm	能	级	统计权重 g_j	跃迁几率/ $(10^8 \cdot s^{-1})$	跃迁几率最优值/%
		E_i/cm^{-1}	E_j/cm^{-1}			
Sc	393.338	168	15585	6	0.45	>50
	402.040	0	24866	4	2.50	>50
	402.369	168	25014	6	1.67	>50
	405.455	0	24657	4	0.68	>50
	408.240	168	24657	4	0.72	>50
	475.316	0	21033	6	0.008	>50
	534.971	168	18856	4	0.88	>50
	567.181	11677	29304	12	0.39	>50
	568.684	11610	29190	10	0.37	>50
	621.068	0	16097	4	0.012	>50
	623.978	0	16022	4	0.006	>50
	625.996	168	16141	6	0.003	>50
	630.567	168	16023	6	0.009	>50
	637.882	0	15673	4	0.001	>50
Se	196.026	0	50997	2	100	>50
	203.985	1989	50997	2	65.0	>50
	206.279	2534	50997	2	21.6	>50
Si	251.611	223	39955	5	1.21	<25
Sn	235.484	1692	44145	5	7.70	>50
	242.949	3428	44576	7	4.29	>50
	270.651	1692	38629	5	2.00	>50
	283.999	3428	38629	5	4.20	>50
	286.333	0	34914	3	0.623	<10
	300.914	1692	34914	3	1.30	>50
	303.412	1692	34641	1	4.40	>50
	317.505	3428	34914	3	1.07	>50
	326.234	8613	39257	3	3.67	>50
	333.062	8613	38629	5	0.38	>50
	380.102	8613	34914	3	0.67	>50
Sr	407.771	0	24517	4	0.16	>50
	421.552	0	23715	2	0.19	>50
	460.733	0	21698	3	1.62	<10
Ta	474.016	9976	31066	4	0.028	>50
	481.275	0	20772	4	0.002	>50
Te	214.275	0	46653	3	38.0	>50
	238.325	4707	46653	3	4.27	>50
	238.576	4751	46653	3	5.47	>50
Ti	318.645	0	31374	7	1.16	>50
	319.199	170	31489	9	1.22	>50
	319.992	387	31629	11	1.27	>50
	334.188	0	29915	7	1.86	>50
	335.464	170	29971	9	1.08	>50
	337.145	0	30039	11	1.00	>50
	337.748	387	29986	7	1.00	>50
	363.546	0	27888	7	0.89	>50
	364.268	0	27615	9	0.98	>50
	365.350	0	27750	11	0.91	>50
	372.982	387	26803	5	0.62	>50
	374.106	387	26893	7	0.54	>50
	375.286	170	27026	9	0.68	>50
	392.453	170	25644	7	0.13	>50
	398.176	170	25107	5	0.68	>50
	398.976	0	25227	7	0.61	>50
	506.466	387	20126	7	0.050	>50
Tl	276.787	0	36118	4	1.02	>50
	351.924	7793	36200	6	4.00	>50
	377.572	0	264.78	2	0.63	<25
V	305.633	137	32847	6	1.67	>50
	306.046	323	32989	8	1.62	>50
	306.638	553	33155	10	2.30	>50

续表

元素	λ/nm	能级		统计权重 g_j	跃迁几率/($10^8 \cdot s^{-1}$)	跃迁几率最优值/%
		E_i/cm^{-1}	E_j/cm^{-1}			
V	318.341	137	31541	8	2.50	>50
	318.398	323	31722	10	3.50	>50
	318.540	553	31937	12	2.17	>50
	319.801	137	31398	6	0.53	>50
	320.741	553	31722	10	0.30	>50
	370.358	2425	29418	8	1.50	>50
	370.470	2311	29296	6	0.92	>50
	370.504	2220	29203	4	0.42	>50
	379.496	2425	28768	10	0.31	>50
	381.349	137	26353	6	0.23	>50
	381.824	0	26183	2	0.85	>50
	382.201	323	26480	8	0.10	>50
	382.856	137	26249	4	0.58	>50
	385.537	0	25931	4	0.38	>50
	385.584	553	26480	8	0.55	>50
	386.486	137	26004	6	0.28	>50
	386.760	323	26172	10	0.030	>50
	390.225	553	26172	10	0.24	>50
	409.269	2311	26738	10	0.22	>50
	410.979	2112	26438	4	0.65	>50
	411.178	2425	26738	10	1.10	>50
	412.357	2153	26397	2	1.15	>50
	412.807	2220	26438	4	0.88	>50
	413.202	2311	26506	6	0.60	>50
	413.449	2425	26605	8	0.34	>50
	437.924	2425	25254	12	0.83	>50
	438.472	2311	25112	10	0.58	>50
	438.997	2220	24993	8	0.49	>50
	439.523	2153	24899	6	0.47	>50
	440.764	2311	24993	6	0.29	>50
	440.820	2220	24899	6	0.47	>50
	459.411	553	22314	12	0.042	>50
W	361.752	2951	30587	7	0.13	>50
	386.798	2951	28797	9	0.052	>50
	400.875	2951	27890	9	0.20	>50
	404.560	2951	27662	5	0.036	>50
	407.436	2951	27488	7	0.14	>50
	426.939	2951	26367	5	0.040	>50
	429.461	2951	26230	5	0.11	>50
	430.211	2951	26189	7	0.043	>50
Y	362.094	530	28140	4	1.55	>50
	404.763	0	24699	2	0.55	>50
	407.738	0	24519	6	0.72	>50
	410.236	530	24900	8	0.64	>50
	412.831	530	24747	6	0.73	>50
	414.285	0	24131	4	0.78	>50
	464.370	0	21529	6	0.063	>50
	467.485	530	21915	8	0.054	>50
	643.500	530	16066	6	0.007	>50
Zn	213.856	0	46745	3	6.3	<25
	277.086	32501	68581	5	0.24	>50
	280.087	32890	68583	7	0.26	>50
	307.590	0	32502	3	0.004	>50
	334.502	32890	62777	7	4.0	>50
	481.053	32890	53672	3	7.00	>50
Zr	351.960	0	28404	7	0.71	>50
	360.119	1241	29002	11	0.91	>50

第二节　仪器装置

火焰原子发射光谱法常用的仪器为火焰光度计，火焰光度计主要包括三部分——激发光源、单色器及光度计。

一、激发光源

激发光源包括气体供应系统、喷雾器和喷灯。其作用是使被测试液雾化，再与可燃气体混合在喷灯上燃烧，使被测元素在火焰中受到激发而产生光谱。通常利用乙炔-空气、乙炔-氧气、汽油-空气、煤气-空气、氢气-空气等燃烧物产生火焰。

火焰的温度取决于燃料，而燃料和空气是通过喷灯的灯嘴喷出燃烧的，因此，火焰的温度除与燃料有关外，还与喷嘴的结构和尺寸有关。喷嘴决定火焰燃烧的程度及稳定性，因此也会影响火焰温度。

整个火焰可分为内焰与外焰两个区。在内焰，由于气体没有完全燃烧，则温度比较低；在外焰，由于气体完全燃烧，则温度比较高（比内焰要高 200～300℃）。分析时使用外焰最高温度处（即靠近内焰的火焰尖头上），表 5-5 是各种气体燃料可以产生的最高温度。

表 5-5　各种气体燃料可产生的最高温度

燃料		煤气	丙（甲）烷	氢气	乙炔	氰
温度 θ/℃	在空气中	1700～1840	1900～2000	2000～2115	2100～2400	
	在氧气中	2700～2800	2600～2700	2500～2810	3100～3200	4580～5000

在实际工作中，一般将燃料在空气中燃烧，因此火焰温度比较低，激发能力不强，只能激发一些激发电位低的原子线，因而使各元素因谱线重迭产生的干扰大大减少，所以火焰原子发射光谱法的准确度要比通常的电弧及火花源发射光谱分析好，特别是对激发电位低的碱金属和碱土金属。

二、分光器

火焰光度计所采用的分光器有简单的滤光片，也有复杂的棱镜或光栅，其作用都是将复合光分解为单色光。简单的分光器，就是一个装有几个滤光片的转动圆盘，测定 K 时，把 K 的滤光片置于光路中，它只让 K 的特征光谱透过，其他波长的光被吸收。测定 Na 时，再换 Na 的滤光片。采用棱镜或光栅作分光器，选择性好，干扰小，可提高测定结果的准确度。

三、光度计

光度计包括光电池、灵敏检流计等，其作用是接受并测量被分析元素的辐射强度。

第三节　火焰原子发射光谱法的误差来源及消除方法

1. 激发条件不稳定

由于激发条件不稳定，会引起辐射强度的改变，也会产生分析误差。激发条件不稳定的主要原因是以下 3 种。

（1）气体压力不稳定　当燃料气和助燃气的压力改变时，会影响火焰的燃烧及试液的雾化情况，也就会影响火焰温度（激发温度）及被测元素原子蒸气在火焰中的浓度，其结果将影响被测元素的辐射强度，从而导致严重的分析误差。为了减少并抑制这种误差，在操作时

必须保持燃料气和助燃气的压力不变。

(2) 喷嘴不清洁　一些微小的、不容易注意到的尘埃停留在喷嘴上，会造成雾化不良，引起较大的分析误差。因此，在进行分析时，要求试液清澈，无机械杂质。同时还要求在测量之后，用蒸馏水或酒精清洗喷嘴。

(3) 液面高度变化　当试液进入火焰时，如果液面高度发生变化，则试液的雾化速率会发生改变，使之进入火焰的被测元素的原子浓度也随着改变，结果将严重影响被测元素的辐射强度，而引起误差。为了减少这种误差，在测量时，必须保持液面高度一致。

2. 被测溶液组成的改变

(1) 被测溶液的物理性能改变　试液雾化情况，不仅取决于喷雾器的特性，而且也取决于溶液的物理特性，例如粘度和表面张力。因此改变溶质浓度或使用另一种溶剂或试剂，都足以影响试液的物理性能，从而引起雾化情况的变化，结果造成分析误差。为了减少并抑制这方面的误差，应使标准溶液与试液的组成尽量接近。

(2) 干扰物质的存在　实验证明，碱金属能使彼此的辐射强度增强，例如 K 对 Rb、Cs 的辐射强度有增强作用。有机溶剂，如甲醇、丙酮等，也能增强碱金属元素的辐射强度。但无机酸有时会减弱碱金属元素的辐射强度。为了消除这种误差，在进行火焰原子发射分析时，尽量使试液与标准溶液的组成相近似。例如测定矿样中的 Rb、Cs，存在碱金属时，可以采取在试液和标准溶液中加入大量 KCl 的办法，以消除其干扰，同时又提高了方法的灵敏度。

近年来为了有效地排除干扰而提高火焰原子发射分析的灵敏度，广泛使用有机溶剂萃取样品，并以有机溶剂代替水溶液喷入火焰。这样一方面可利用有机溶剂的萃取作用使分析元素得到富集，从而减低基体元素和其他杂质对测定的干扰；另一方面又改善了溶液的物理性能，如粘度、张力等，也改善了试液的雾化情况。其结果使测定误差大为减少，而使灵敏度大大提高。

3. 仪器方面

如果所用滤光片质量不好；采用棱镜或光栅时，狭缝太宽；或是光电池长时间使用产生疲劳现象等等，都能造成测定结果的误差。因此，在进行测定时，必须考虑这些影响因素，减少误差。

近年来有不少原子吸收分光光度计也带有火焰发射装置，其原理和火焰光度计是一样的，这样使测定的领域更为宽广。

第四节　火焰原子发射光谱法的应用

表 5-6　火焰原子发射光谱法的应用

测定元素	样 品	分析方法	火焰种类	检测波长/nm	检出限	文献
Li	钽酸锂	火焰 AES	空气-丁烷-丙烷	670.8	0.05μg·g^{-1}	1
Li	石墨	火焰 AES	—	670.8	—	2
Li	血清，尿	一阶导数 AES	空气-乙炔	—	0.097μg·g^{-1}	3
Li	血清，血浆	火焰 AES	—	—	—	4
Li	铋	火焰 AES	—	—	—	5
B	核燃料回收厂的液流	火焰 AES	空气-乙炔	548	0.2μg	6
Ba	铝硅钡铁	火焰 AES	空气-乙炔	553.7	—	7
B	葡萄酒	火焰 AES	空气-乙炔	548	6ng·ml^{-1}	8
B	钢，合金	萃取火焰 AES	空气-氢气	546	35ng	9

续表

测定元素	样品	分析方法	火焰种类	检测波长/nm	检出限	文献
B	氮化硼	火焰AES	—	518	—	10
Na	原水,饮用水	火焰AES	空气-乙炔	330.2	0.03mg·L^{-1}	11
Na	食用橄榄	火焰AES	—	—	—	12
Na	血清,尿	火焰AES	—	—	—	13
Na	氧化铝	火焰AES	—	589	—	14
Na,Ti	水泥	火焰AES	空气-乙炔	589.0	—	15
Na	血浆	火焰AES	—	—	—	16
Na	肥料	火焰AES	—	—	—	17
Al	—	溶剂萃取-火焰AES	—	—	—	18
Al	矿物	火焰AES	N_2O-乙炔	396.15	—	19
S	飞机机仓内空气	火焰AES	—	—	—	20
S	金属,硫化物,试剂,橡胶	火焰AES测定Ba,间接测定S	N_2O-乙炔	—	1μg·g^{-1}	21
S,P	井水	火焰AES	—	S 384;P 526	—	22
S,P	农药	电射流-火焰AES-微型柱LC	—	S 384;P 526	S 0.2μg, P 5ng	23
SO_4^{2-}	雨水	火焰AES测定Ba,间接测定SO_4^{2-}	N_2O-乙炔	553.6	—	24
SO_4^{2-}	—	火焰AES	氢气-氮气	374.0	3.2mg·L^{-1}	25
K	—	火焰AES-FIA	—	—	0.002 μg·g^{-1}	26
K	汽油,润滑油	火焰AES-FIA	空气-丙烷	—	—	27
K	唾液,血液	火焰AES	—	—	—	28
K	原水,饮用水	火焰AES	空气-乙炔	769.9	0.08mg·L^{-1}	11
K	肥料	火焰AES	空气-煤气	—	—	29
K	制取磷酸二氢钾的控制分析	火焰AES	空气-煤气	—	—	30
K	血清	火焰AES	—	766.5	—	31
Ba	$NaCl$,$NaNO_3$	萃取火焰AES	—	553.6	0.06μg·ml^{-1}	32
Ca	高含量钠溶液	火焰AES	空气-丁烷	—	—	33
Ca	润滑油	火焰AES	N_2O-乙炔	422.7	—	34
V	—	火焰AES	N_2O-乙炔	437.8	—	35
Mn	玻璃	火焰AES增量法	—	—	—	36
Sr	闪长石,暗色岩,花岗岩,砂岩,石灰石	火焰AES	空气-乙炔	460.7	5ng	37
Ag	定影液	萃取火焰AES	—	—	1.3μg·ml^{-1}	38
In	铝合金	火焰AES	N_2O-乙炔	451.13	0.5μg·ml^{-1}	39
Sn	有机锡化合物	火焰AES	空气-乙炔	—	—	40
Cs	硝酸铀酰	萃取火焰AES	—	852.1	—	41
Ba	近海油井水	火焰AES	—	553.6	0.05μg·ml^{-1}	42
Ba	玩具材料	火焰AES	空气-乙炔	553.5	0.002μg·ml^{-1}	43
Ba	涂料的颜料和填充剂	萃取火焰AES	N_2O-乙炔	553.5	—	44
Ba	碳酸钡	火焰AES	N_2O-乙炔	455.4	—	45
Ba	锅炉给水	火焰AES	N_2O-乙炔	553.5	—	46
La	稀土精矿	火焰AES	N_2O-乙炔	441.8	0.8μg·ml^{-1}	47
Nd	陶瓷色料	火焰AES	—	—	0.17μg·ml^{-1}	48
Eu	岩石	火焰AES	—	—	—	49
U	—	火焰AES	N_2O-乙炔	—	5μg·ml^{-1}	50
Na,K	砷化镓	火焰AES	—	—	Na0.01μg·ml^{-1}, K0.03μg·ml^{-1}	51

续表

测定元素	样 品	分析方法	火焰种类	检测波长/nm	检出限	文献
Na,K	氯化铅	火焰 AES	气体-空气	Na 589.0～589.6;K766.5	2μg · ml^{-1}	52
Na,K	白云石	火焰 AES	—	—	—	53
Na,K	钠长石钾长石	火焰 AES	—	—	—	54
Na,K	粘性土壤	火焰 AES	—	—	—	55
Na,K	工业硅	火焰 AES	—	Na589.0;K766.5	—	56
Na,K	钽粉	火焰 AES	空气-乙炔	Na589.0;K766.5	—	57
Na,K	—	火焰 AES	—	—	—	58
Na,K	血清,尿	FI-火焰 AES	—	—	—	59
K,P	植物	FI-火焰 AES	—	—	—	60
Li,Na,K	—	火焰 AES	空气-乙炔	—	Na0.002μg · ml^{-1} Li0.002μg · ml^{-1} K0.008μg · ml^{-1}	61
Li,Na,K	氯化锂	火焰 AES	空气-乙炔	Li 670.8; Na 589.0; K 766.5	灵敏度 Li 5ng · ml^{-1} Na25ng · ml^{-1} K10ng · ml^{-1}	62
Li,Na,K	岩石	火焰 AES	空气-乙炔	—	—	63
Li,Na,K	玻璃	火焰 AES	丙烷-丁烷-空气及空气-乙炔	—	≤0.7μg · g^{-1}	64
Li,Na,K	高纯镉、碲、碲化镉和 Cd_xHg_{1-x}	火焰 AES	空气-乙炔	Li670.8; Na589.0; K766.5	Li0.2ng · ml^{-1} Na1.0ng · ml^{-1} K1.6ng · ml^{-1}	65
Li,Rb,Sr	地质试样化石试样	火焰 AES	空气-乙炔或 N_2O-乙炔	Li670.8; Rb794.8; Sr460.7	—	66
Li,Rb,Sr	食品	火焰 AES	—	—	Li0.0013μg · g^{-1} Rb0.19μg · g^{-1} Sr0.21μg · g^{-1}	67
K,Rb,Sr	—	火焰 AES	煤气-空气和空气-乙炔	K766.5; Rb780.2; Sr852.1	—	68
Li,Na,K,Rb,Cs	岩石、高纯材料	火焰 AES	空气-乙炔	依次为 670.8, 589.0, 766.5, 794.8, 852.1	0.01μg · g^{-1}	69
Li,K,Pb,Cs	—	火焰 AES	—	—	—	70
Li,Na,K,Rb,Cs	矿物、岩石	火焰 AES	—	—	—	71
Li,Ba,Ca	润滑剂	火焰 AES	—	Li671; Ba494; Ca422	—	72
Na,K,Li,Ca,Ba	饮用水,临床化学的现场测定	火焰 AES	—	—	—	73
Ca,Mg,Na,K	酒	火焰 AES	—	—	—	74
Na, K, Ca, Mg,Fe,Zn	葡萄酒	火焰 AES	—	—	—	75
Ca,Ba	—	火焰 AES	空气-乙炔	Ba553.6; Ca422.7;	Ca0.12μg · g^{-1},Ba0.83μg · g^{-1}	76
Li, Na, Ca, Ba,Sr	—	火焰 AES	空气-乙炔	依次为 670.8, 589.6, 422.7, 553.5, 460.7	依次为 0.91, 0.4, 0.69, 213, 6.4μg · g^{-1}	77
Li,Na,K,Rb,Cs,Ca,Sr,Ba	钨酸钠	火焰 AES	—	—	—	78
Ca, Mg, Ba, Sr, Mn, Co, Ni, Cu, Cr, Pb, Fe, Al,V	Kansas 页岩	火焰 AES	空气-乙炔	依次为 422.68,285.22, 455.4, 460.73, 403.3, 345.35, 352.45,324.75, 425.44,405.78, 371.99,396.15, 437.92	依次为 0.03, 0.07,0.04, 0.003,0.02, 0.05,0.07, 0.06,0.04,0.2, 0.04,0.03, 0.3μg · g^{-1}	79

续表

测定元素	样品	分析方法	火焰种类	检测波长/nm	检出限	文献
Zn, B, Ba, Cu, Fe, Al, Mn, Mo, Ni, Pb, Si, Cr, Co, Cd, As	槟榔花、幼果、青果、成熟果和叶	火焰 AES	—	—	—	80
C, S, N, P	--	脉冲火焰 AES	—	—	(0.01～60) pg·s⁻¹	81
氧化亚氮	—	火焰 AES	—	—	—	82
Ga, In, Tl	砷化镓和锑化砷半导体、萤石、陶土等	火焰 AES	N_2O-乙炔	Ga417; Y451; Tl535	—	83
Sc, Y, La	稀土精沙, 玻璃砂、铝-钇石榴石	火焰 AES	N_2O-乙炔	—	(0.0108～0.06)$\mu g \cdot g^{-1}$	84
Ce, La, Nd, Pr		火焰 AES	N_2O-乙炔	—		85
Nb, Ta, Ti	铌铁矿, 钽铁矿	火焰 AES	—	—	Nb0.3mg·L^{-1}, Ta0.6mg·L^{-1}, Ti0.3mg·L^{-1}	86
Eu, Yb, Ho	镧系元素氧化物	火焰 AES	—	Eu459.4; Yb398.8; Ho405.39	Eu2$\mu g \cdot g^{-1}$, Yb5$\mu g \cdot g^{-1}$, Ho50$\mu g \cdot g^{-1}$	87
Yb, Ce, Tb, Lu	稀土矿、精矿	火焰 AES	—	—	—	88
Al, Sc, Y, LaO, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	稀土矿	火焰 AES	N_2O-乙炔	依次为: 396.15, 391.18, 362.09, 441.82, 520.2, 495.14, 494.48, 478.31, 459.4, 434.65, 432.65, 404.6, 405.39, 400.8, 371.79, 398.8, 451.86	依次为: 3, 10, 120, 60, 10000, 300, 150, 30, 0.1, 300, 500, 40, 30, 30, 40, 0.8, 2000ng·ml^{-1}	89
Pr, Nd, Sm, Ga	地质试样, 矿石	火焰 AES	—	依次为: 495, 494, 478, 434	Pr、Ga 为 0.3$\mu g \cdot ml^{-1}$, Nd 为 0.2$\mu g \cdot ml^{-1}$; Sm 为 30ng·ml^{-1}	90
牛磺酸	生物试样	火焰 AES	—	—	—	91
Cr(Ⅲ) Cr(Ⅵ)	饮用水, 天然水	火焰 AES	N_2O-乙炔	—	Cr(Ⅲ)25pg·ml^{-1}; Cr(Ⅵ) 20pg·ml^{-1}	92
Li_2O, MgO	β-氧化铝基电极	火焰 AES	—	Li670.8; Mg285.2	—	93
Sr, Ba, Ca	重晶石沉淀物	火焰 AES	空气-乙炔	—	—	94
Li, Cs, Sr, Ba	饮用水, 废水	火焰 AES	—	—	—	95
碱金属和 Ba	合成铌酸盐	火焰 AES	—	—	—	96
碱金属	—	火焰 AES	—	—	—	97
碱和碱土金属	地质化学试样	火焰 AES	—	—	碱和碱土金属为(0.01～0.1)$\mu g \cdot g^{-1}$; 其他金属为(10～1000)$\mu g \cdot g^{-1}$	98
二丁基锡, 三丁基锡	海水, 河口水	火焰 AES	—	—	10ng·L^{-1}	99
有机氯农药, 有机磷农药	羊毛脂	火焰 AES	—	—	(0.01～0.05)$\mu g \cdot g^{-1}$, 0.1$\mu g \cdot g^{-1}$	100

本表参考文献:

1 Aleshina G R, Sokolskaya N N, Sukhina O G. Khim Promst. Ser: Reakt Osobo Chist Veshchestva, 1979; (3): 5
2 Чихладзе А, Рчеулищвили Л А Н. Ж анал хим, 1989; 44 (10): 1885
3 Dol I, Knochen M et al. Analyst, 1992; 117(8): 1373
4 杨建文, 周润香, 徐功杰. 临床检验杂志. 1991; 9(4): 175
5 辛仁轩, 王国欣. 光谱实验室, 1993; 10(4): 41、58
6 Siemer, Darryl D. Anal Chem, 1982; 54(8): 1321
7 蔡幼卿, 倪庆福. 理化检验 (化学分册), 1994; 30(4): 227
8 Sanz J, Lopez Martin R, Galban J et al. Analusis, 1990; 18 (4): 279
9 Панов ВА, Семененко К А, Кузнков Ю Я. Ж анал химмо, 1989; 44 (8): 1382
10 Телегин Г Ф, Чанышева Г Я, Шилкина Н Н. Ж анал хим,

1989; 44 (8): 1510

11 Department of the Environment and National Water Council. H M Slationary Office, 1981: 18

12 Garcia P, Brenes M et al. Analyst, 1992; 117 (2): 173

13 潘忠孝，陈 燕，石晶等. 中华医学检验杂志，1993; 16 (1): 18

14 BS 4140; Part 11; 1986 (ISO 1617—1976). British Standards Institution. 1986: 8

15 Epstein M S, Rush T A. Appl Spectrosc, 1991; 45 (9): 1568

16 Schots J, De Raeve H et al, Clin Chem. 1992; 38 (4): 558

17 Corominas L F, Navarro R A, Lopez R J. J Arsoc off Anal Chem, 1984; 67 (5): 886

18 Quinonero J, Mongay C, De la Guardia M. Microchem J, 1991; 43: 213

19 Otruba V, Navratil D. Chem Listy, 1990; 84 (8): 862

20 Boatman J F, Luria M, Van Valin C C et al. Atoms Enriron, 1988: 22 (9): 1949

21 Puacz, Wojciech. Mikrochim Acta, 1982; I (3-4): 271

22 Cheung Y Y, Kirkbright G F, Snock RD. Anal Chim Acta, 1982; 140 (1): 213

23 岡崎重光，铃木義仁. 日本化学会志，1990; 1 (1): 38

24 Wagner, George H, Steele et al. Int lab, 1982; 12 (7): 12

25 Hauge S, Maroy K, Thorlacius A. Anal Chim Acta, 1991; 243 (2): 227

26 Esmadi F T, Kharoaf M A. Can J Appl Spectrosc, 1991; 36 (3): 70

27 Roscoe G E, Miles R, Taylor C G. Anal Chim Acta, 1990; 234 (2): 439

28 陈涟如，毛智豪等. 中国药学杂志，1994; 29 (8): 478

29 Bacetti L B, Graner C A F, Ionashiro M. Ecletica Quim, 1983; (8): 13

30 魏义翰，黄耀芬. 化学世界，1985; 26 (19): 334

31 樽本雅夫，谷 涉，林浩次等. 分析化学（日），1989; 38 (9): T140

32 Billah M, Honjo T et al. Fresenius J Anal Chem, 1993; 347 (3/4): 107

33 Edward-Inatimi E B. Indian J Chem Sect A, 1986; 25A (11): 1063

34 De la Guardia C M, Salvador C A, Berenguer N V. Analusis, 1980; 8 (9): 448

35 Wood P J, Galobardes J F, Rogers L B. Anal Chim Acta. 1982; 135 (1): 145

36 Svejda H, Keram Z. 1982; 34 (5): 269

37 Karmancva N G, Pogrebnyak Yu F. Zavod Lab, 1981; 47 (11): 40

38 Кучкарев Е А, Эльяс Б, Петрухин О М. Завод лоб, 1989; 55 (12): 32

39 Bernal J L, Del Nozal M J, Deban L et al. Talanta, 1982; 29 (12): 1113

40 Marr L L, Anwar J. Analyst, 1982; 107 (1272): 260

41 杨思奇，许勇强，温湘玉. 原子能科学技术，1991; 25 (3): 71

42 Jerrow M, Marr I L, Cresser M S. Anal Proc, 1991; 28 (2): 40

43 张萍，徐京龙等. 光谱实验室，1995; 12 (4): 41

44 Commissione P V U. Pitture Vernici, 1982; 58 (1): 56

45 Lyubimov V F, Lukyanova V I, Khim Prom-st ser; Metody Anal Kontrolya Kach Prod Khim Prom-sti, 1981; (9): 28

46 Johnson K E, Yerhoff F W, Robinson et al. Anal Chim Acta, 1983; 149: 129

47 Kamar M, Srivastava P K. Analyst, 1993; 118 (2): 193

48 Mauri A R, Domenech M T, De la Guardia M et al. At Spectrosc, 1990; 11 (3): 90

49 Bohacek Z, Otruba V, Jamber J. Chem Listy, 1985; 79 (3): 323

50 Schiefer H P, Gramain P, Kraeminger E. Fresenius'Z Anal Chem, 1980; 303 (1): 29

51 Beinrobr E, Siles B, Stefance J et al. Chem Pap, 1991; 45 (1): 61

52 Zhiteleva O G, Zhuleva E V. Khim Prom-st ser. Reakt Osobo Chist Veshchestva, 1981; (1): 33

53 Koscielnjak P, Walas S, Parczewski A. Fresenius'Z Anal Chem, 1980; 302 (5): 402

54 黄仕永. 岩矿测试，1986; 5 (4): 274

55 张福隆，张清. 土壤通报. 1987; 18 (5): 237

56 Столярова И В. Градскова, Бочкарев В Н. Завод лаб, 1985; 51 (9): 29

57 武骏钦，郑永章. 分析试验室，1987; 6 (7): 15

58 肖礼钦，余阳印. 铀矿冶，1989; 6 (7): 15

59 Araujo A N, Lima J L F C. J Trace Elem Electrolytes Health Dis, 1989; 3 (2): 97

60 綦亚岐，吴金绥. 化学通报，1991; (11): 41

61 陈天裕，金佑国. 分析试验室，1989; 8 (2): 12

62 Chruscinska, Teresa J. Chem Anal. 1981; 26 (2): 347

63 罗方若，朗春燕，汪模辉. 理化检验（化学分册）. 1991; 27 (4): 230

64 Дрожжина Т В, Ганюшкина Л В. Чистякова Л А. Завод лаб, 1991; 57 (6): 28

65 Зеленцова Л В. Ж анал хим, 1990; 45 (3): 589

66 Shapkina Yu S, Prudnikov E D. Zh Anal Khim. 1980; 35 (10): 1891

67 Evans W H, Read J I. Analyst, 1985; 110 (6): 69

68 Hsia Yu-Yu, Wei Keng-Chuan. Fen Hsi Hua Hsueh, 1980; 8(4): 336

69 Прудников Е Д, Шапкина Ю С. Ж анал хим, 1990; 45 (9): 1740

70 Tilotta D C, Fry R C, Fateley W G. Talanta, 1990; 37 (1): 53

71 Hansen N B. Kem Anal Miner Bjergarter, 1981: 60

72 Wyganowski C, Cyganski A, Magiera B. Chem Anal, 1980; 25 (3): 387

73 Schuler P. GIT Fachz Lab, 1987; 31 (3): 217

74 Gallego R, Bernal J L, Del Nozal M J. An Bromatol, 1981; 33 (2): 191

75 Falcon Florido J T, Fernandez M C et al. An Bromatol, 1983; 35 (11): 31

76 金珊，姚丽珠. 分析试验室，1995; 14 (4): 57

77 Busch K W, Busch M A, Benton L D. Talanta, 1990; 37 (1): 89

78 Золотовицкая Э С, Потапова В Г, Друзкенко Т В……. Ж анал хим, 1991; 46 (12): 2423

79 Amini M K, Defreese J D, Hathaway L R. Appl Spectrosc, 1981; 35 (5): 497

80 何和明. 中药材，1990; 13 (1): 35

81 Cheskis S, Atar E et al. Anal Chem, 1993; 65 (5): 539

82 Gassmann G, Dahlke S. J Chromatogr, 1992; 598 (2): 313

83 Otruba V, Vavratil D. Chem Listy, 1987; 81 (6): 630

84 Otruba V, Bohacek Z, Sommer L. Chem Listy, 1985; 79 (12): 1295

85 Mauri A R, De La Guardia M. J Anal At Spectrom, 1988; 3 (8): 1111

86 Pillai C K, Natarajan S. Venkateswarlu C. At Spectrosc, 1985; 6 (2): 53

87 Kuban V, Jancarova I et al. Anal Chim Acta, 1991; 254 (1/2): 21

88 Otruba V, Skalnikova B. Chem Listy, 1991; 85 (7): 736

89 Otruba V, Sommer L. Fresenius'Z Anal Chem, 1989; 335 (8): 887

90 Otruba V, Tejralova I. Chem Listy, 1990; 84 (9): 978

91 冈崎庸树，片冈洋行等. 分析化学（日），1989; 38 (8): 401

92 Jozsef P, Attila G, Robert T et al. Fresenius J Anal Chem, 1996; 355 (5～6): 719

93 Зологовицкая Э С, Потапова В Г, Друзенко Т В. Завод лаб, 1987; 53 (4): 33

94 Дудникова Т Ю, Балакирева Р С, Таврин А Е. Завод лаб, 1988; 54 (6): 29

95 Крыштаб Т Г, Кладько В П, Фомин А В. Завод лаб, 1991; 57 (6): 36

96 Кустова Л В, Белая К Н, Нерсесян М Д. Завод лаб, 1988; 54 (11): 51

97 杨文炳. 光谱实验室，1991; 3 (6): 25

98 Prudnikov E D, Shapkima Yu S. Minoval Geokhim, 1979; (6): 141

99 Valkirs A O, Seligman P F, Olson G J et al. Analyst, 1987; 112 (1): 17

100 Miyahara M, Suzuki T et al. J Agric Food Chem, 1992; 40 (1): 64

第二篇　原子吸收光谱法和原子荧光光谱法

第六章　原子吸收光谱法基本原理、基本数据和仪器

第一节　原子吸收光谱法的基本原理[1~5]

一、不同能级的原子的分布

原子吸收光谱法是基于测量蒸气中原子对特征电磁辐射的吸收强度进行定量分析的一种仪器分析方法。按照热力学理论，在热平衡状态下，基态原子和激发态原子的分布符合波兹曼公式：

$$\frac{N_i}{N_0}=\frac{g_i}{g_0}\exp(-E_i/kT) \tag{6-1}$$

式中，N_i 和 N_0 分别表示激发态和基态的原子数；k 是波兹曼常数；g_i 和 g_0 分别是激发态和基态的统计权重；E_i 是激发能；T 是热力学温度。表 6-1 列出了在火焰原子吸收通常的温度下，几种元素的共振激发态与基态原子数之比。结果表明，基态原子的数目受温度变化的影响很小，并近似地等于原子总数。

表 6-1　某些元素共振激发态与基态原子数之比

元素	谱线 λ/nm	E_i/eV	g_i/g_0	N_i/N_0		
				2000K	2500K	3000K
Na	589.0	2.104	2	0.99×10^{-5}	1.44×10^{-4}	5.83×10^{-4}
Sr	460.7	2.690	3	4.99×10^{-7}	1.13×10^{-5}	9.07×10^{-5}
Ca	422.7	2.932	3	1.22×10^{-7}	3.65×10^{-6}	3.55×10^{-5}
Fe	372.0	3.332		2.29×10^{-9}	1.04×10^{-7}	1.31×10^{-6}
Ag	328.1	3.778	2	6.03×10^{-10}	4.84×10^{-8}	8.99×10^{-7}
Cu	324.8	3.817	2	4.82×10^{-10}	4.04×10^{-8}	6.65×10^{-7}
Mg	285.2	4.346	3	3.35×10^{-11}	5.20×10^{-9}	1.50×10^{-7}
Pb	283.3	4.375	3	2.83×10^{-11}	4.55×10^{-8}	1.34×10^{-7}
Zn	213.9	5.795	3	7.45×10^{-15}	6.22×10^{-12}	5.50×10^{-10}

二、原子吸收线

原子吸收线的基本特征常以谱线波长、谱线轮廓及谱线强度来描述。

（一）谱线波长

与发射谱线一样，吸收谱线的波长也决定于原子核外价电子产生跃迁的两个能级的能量差，即

$$\Delta E=h\nu=h\ \frac{c}{\lambda} \tag{6-2}$$

原子吸收测量采用的是共振吸收线，即相当于最低激发态和基态间的跃迁谱线，显然，原子的共振吸收线与其共振发射线应具有相同的波长，对多数元素来说符合这情况，但对某些

元素共振吸收线和发射线的轮廓不一样，因而最灵敏的发射线不一定就是最灵敏的吸收线。例如，Co 的最灵敏吸收线的波长为 240.7nm，最灵敏发射线的波长为 352.7nm。

由于在原子吸收分析中，仅考虑由基态产生的跃迁。理论证明共振吸收线的数目 N_{abs}为

$$N_{obs}=\sqrt{2N_{em}} \tag{6-3}$$

而发射线的数目 N_{em}为

$$N_{em}=\frac{n(n-1)}{2} \tag{6-4}$$

式中 n 为原子的总能级数。可见吸收线的数目比发射线的数目少得多。

（二）谱线轮廓

原子吸收线并非是几何学意义上的线，而是有一定宽度。描述原子吸收线轮廓的值是吸收线的中心波长 λ_0 和吸收线的半宽 $\Delta\lambda$（或 $\Delta\nu$）。中心波长的位置由原子能级分布特征决定。原子吸收线的半宽受多种因素影响。

1. 自然变宽

由激发态原子的平均寿命所决定的光谱线的宽度称为自然宽度，对谱线自然宽度记作：

$$\delta\nu_N=\frac{1}{\Delta\tau} \tag{6-5}$$

式中 $\delta\nu_N$ 为自然宽度；$\Delta\tau$ 为激发态原子的平均寿命，寿命越短，谱线越宽；$\delta\nu_N$ 约为 10^{-14}m 量级，自然宽度是谱线的固有宽度。不同谱线的 $\delta\nu_N$ 是不同的。

2. 多普勒变宽（$\delta\nu_D$）

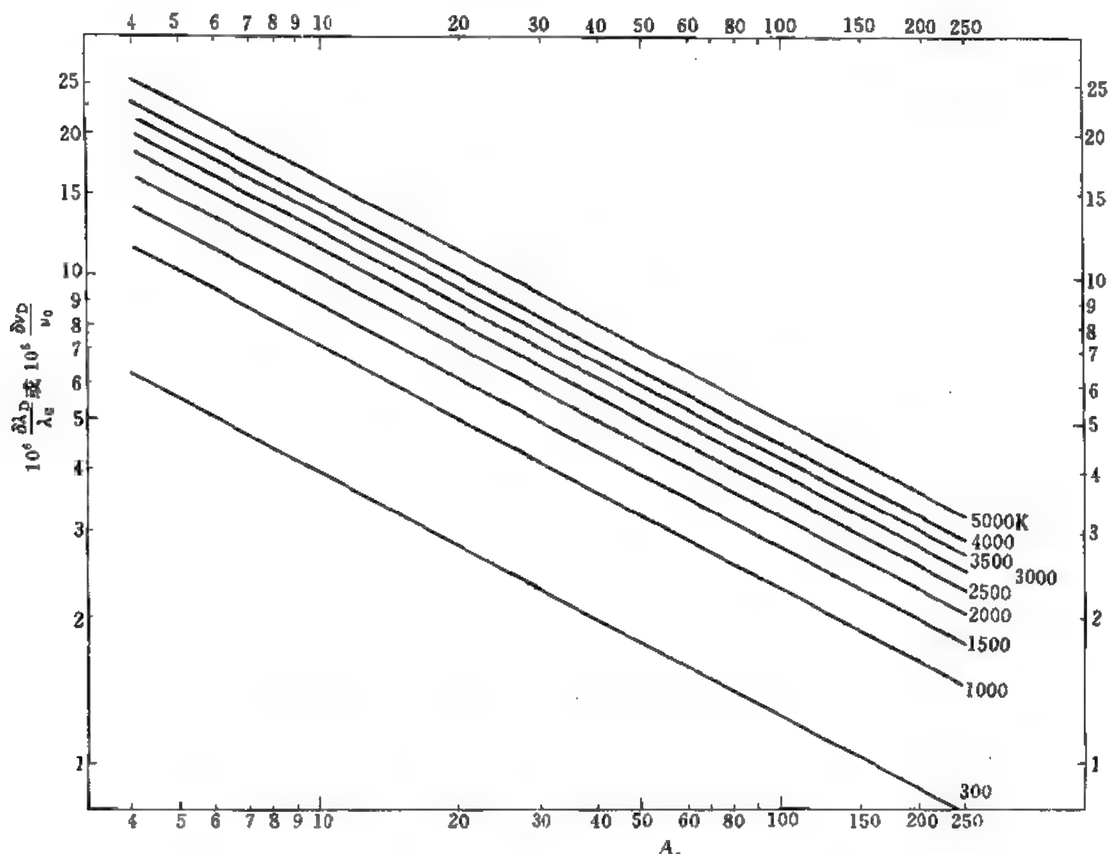


图 6-1 $\delta\lambda_D/\lambda_0$ 随相对原子质量（A_r）变化曲线

多普勒(Doppler)变宽即热变宽，是由原子相对于观测器的杂乱无章的热运动引起的。这种变宽用下式描述

$$\frac{\delta\lambda_D}{\lambda_0}=\frac{\delta\nu_D}{\nu_0}=7.16\times10^{-7}\sqrt{\frac{T}{A_r}} \tag{6-6}$$

式中，$\delta\nu_D$、$\delta\lambda_D$ 表示谱线多普勒变宽；λ_0 或 ν_0 为谱线的中心波长或频率；T 为热力学温度；A_r 为相对原子质量。图 6-1[10]给出了在 300～5000K 温度范围内，$\delta\lambda_D/\lambda_0$ 随原子量的变化。

3. 碰撞变宽（$\delta\nu_C$）

碰撞变宽又称压力变宽，根据碰撞性质不同可分为罗仑茨（Lorentz）变宽和霍耳兹马克（Holtzmark）变宽两种。

罗仑茨变宽 $\delta\nu_L$ 为

$$\delta\nu_L=9740\times10^{15}P\sigma_L^2\sqrt{\frac{2R}{\pi T}\left(\frac{1}{A}+\frac{1}{M_2}\right)} \tag{6-7}$$

式中，P 为外部气体压力，mmHg❶；σ_L 为罗仑茨碰撞有效截面；A 为辐射原子的相对原子质量；M_2 为气体粒子质量；R 为气体常数；T 为热力学温度。用波长表示为

$$\delta\lambda_L=9740\times10^{15}P\sigma_L^2\frac{\lambda_0^2}{C}\sqrt{\frac{2R}{\pi T}\left(\frac{1}{A}+\frac{1}{M_2}\right)} \tag{6-8}$$

霍耳兹马克变宽又称共振变宽，它是由辐射原子与同类原子之间发生非弹性碰撞而引起的，其值为

$$\delta\lambda_R=4.484\lambda_0^3fC \tag{6-9}$$

式中，C 是原子浓度；f 为振子强度；λ_0 是辐射原子的中心波长。由式（6-9）可知 $\delta\lambda_R$ 与被测元素浓度 C 成正比，与共振吸收线波长立方成正比。

4. 自吸变宽

光源辐射共振线被光源周围较冷的同种原子所吸收的现象，称为“自吸”。严重的谱线自吸收就是谱线的“自蚀”。自吸现象使谱线强度降低，同时导致谱线轮廓变宽。

5. 同位素变宽

同一种元素存在多种同位素，其各自具有一定宽度的谱线。观察到的谱线是组合谱线。这种变宽并不小于多普勒及罗仑茨变宽。

（三）谱线强度

吸收谱线强度是指单位时间、单位体积内，基态原子吸收辐射能的总量。其大小决定于单位体积内的基态原子数、单位时间内基态原子的跃迁机率及谱线的频率。在一定条件下，吸收谱线强度与单位体积内基态原子数成正比。

三、吸光度与被测元素浓度关系

（一）积分吸收

根据经典爱因斯坦理论，谱线的积分吸收与单位体积原子蒸气中基态原子数关系为

$$\int K_\nu d\nu=\frac{\pi e^2}{mc}fN_0 \tag{6-10}$$

式中，e 为电子电荷；m 为电子质量；c 为光速；f 为振子强度；N_0 为单位体积原子蒸气中基

❶ 1mmHg=9.807Pa。

态原子的数目。

在通常原子吸收光谱分析条件下处于激发态的原子数很少，基态原子数可以近似地认为等于吸收原子数。

（二）峰值吸收

在吸收线宽主要取决于多普勒变宽时，峰值吸收与积分吸收的关系为

$$K_0 = \frac{2b}{\Delta\nu}\int K_\nu \mathrm{d}\nu \tag{6-11}$$

式中，K_0 为峰值吸收系数；$\Delta\nu$ 为吸收线的半宽；b 为与谱线变宽因素有关常数。将式(6-10)代入式(6-11)

$$K_0 = \frac{2b\pi e^2}{\Delta\nu mc} f N_0 \tag{6-12}$$

上式表示峰值吸收系数与单位体积内吸收原子数目关系。

（三）原子吸收实用关系式

应用于原子吸收分光光度测定中的实用基本关系式可简单地表达为

$$A = K'C \tag{6-13}$$

式中，A 为吸光度；C 为待测元素的浓度；K' 为与实验条件有关的常数。此式表明，在确定的实验条件下，吸光度与待测元素浓度成线性关系。

四、原子化过程

（一）火焰原子化的基本过程和火焰中发生的基本反应

1. 火焰原子化的基本过程

样品原子化过程示意图见图 6-2。

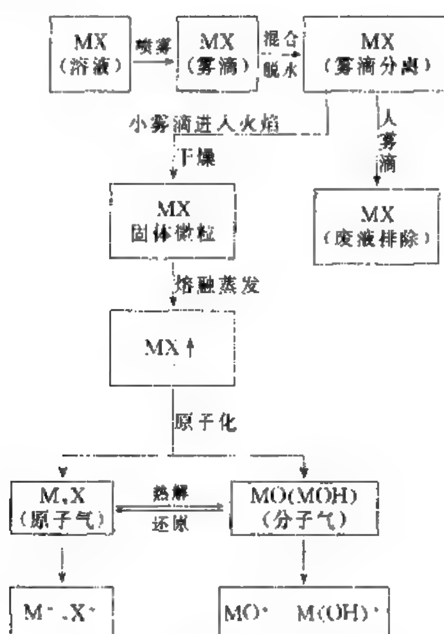


图 6-2　火焰原子化过程示意图

2. 火焰中发生的基本反应

火焰中发生的基本反应可归结为 5 种主要行为，见表 6-2。

表 6-2 火焰中发生的基本反应

行为	反应		说明
热解行为	$\mathrm{MX}_{(气态)} \underset{化合}{\overset{热解}{\rightleftharpoons}} \mathrm{M} + \mathrm{X}$；$\mathrm{M} \rightleftharpoons \mathrm{M}^{*}$；$\mathrm{M} \rightleftharpoons \mathrm{M}^{+} + e$	解离度 $\beta = \dfrac{1}{1+\dfrac{[x]}{f(T)}\exp\dfrac{D_0}{kT}}$	式中 $f(T)$——温度函数；k——波尔兹曼常数；D_0——MX 解离能；T——热力学温度
还原行为	$2MO+C^{*} \longrightarrow 2M+CO_2$ $MO+NH \longrightarrow M+N+OH$	$5MO+2CH^{*} \longrightarrow 5M+2CO_2+H_2O$ $MO+CN \longrightarrow M+CO+N \cdots$	
化合行为	$MX+\begin{cases} O \rightleftharpoons MO \rightleftharpoons MO(固)；MO \rightleftharpoons MO^{*} \\ OH \rightleftharpoons MOH \rightleftharpoons MOH^{*} \end{cases}$		
电离行为	$M \overset{\triangle}{\rightleftharpoons} M^{+}+e$	$\dfrac{x^2}{1-x^2}=3.16\times10^{-7}T^{3/2}\exp\dfrac{-E_i}{kT}$	式中 E_i——原子电离电位
光谱发射和吸收行为	$M^{*} \longrightarrow M+h\nu$(原子光谱) $MX^{*} \longrightarrow MX+h\nu$(分子光谱)		

（二）无火焰原子化的基本过程和原子化机理

1. 无火焰原子化过程

不同于火焰原子化，石墨炉高温原子化采用直接进样和程序升温方式，样品需经过干燥→灰化→原子化 3 个阶段。在石墨炉中随着待测元素的原子化，基态原子的密度不断增大，同时又由于对流，扩散作用和发生再化合或凝聚而减少，其原子化过程及损失途径见图 6-3。

2. 无火焰原子化机理

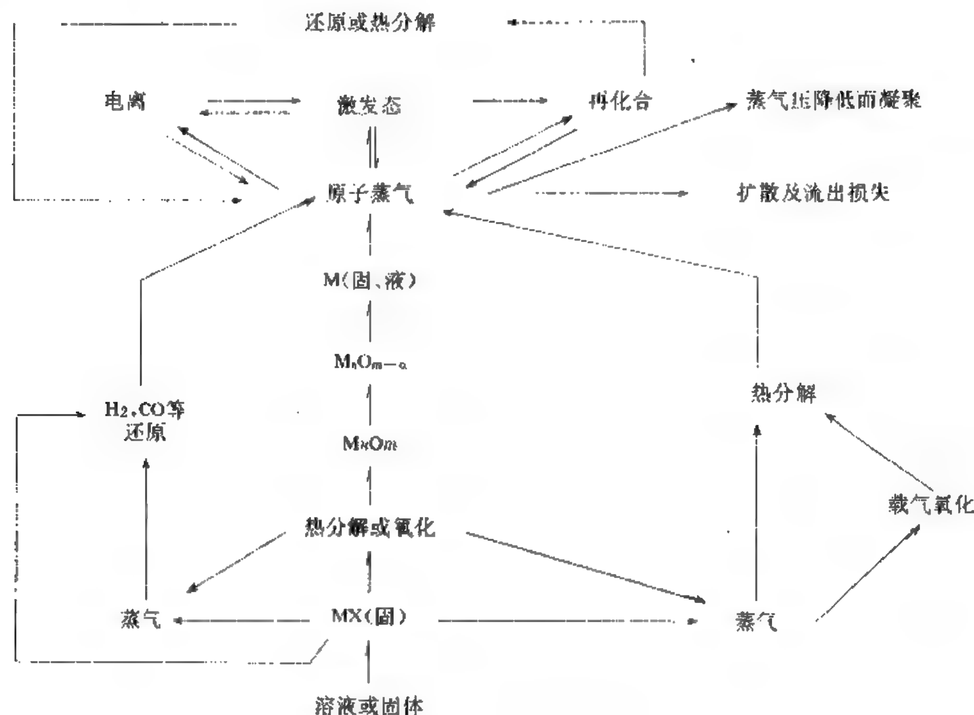


图 6-3 无火焰原子化过程示意图

搞清原子化的机理对于提高原子化效率和消除各种基体干扰都有重要意义。

(1) 还原作用　石墨炉内具有较强的碳还原气氛，在灰化阶段由硝酸盐分解产生的氧化物或原来的氧化物被碳还原为自由原子。



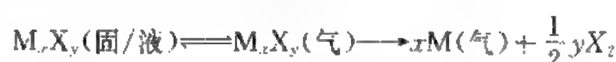
$$MO(固)+C(固)\xrightleftharpoons{K}M(气)+CO(气)$$

(2) 热解作用　通过炉子的高温使金属氧化物解离。不同盐类的解离方式不同。Sturgeon假设金属氧化物的原子化为一级反应，由此导出在测定温度为 T' 时吸光度 At 与热力学温度 T 的关系为

$$\lg At = A_0 - \frac{D_0}{2.3R} \cdot \frac{1}{T} \tag{6-14}$$

式中，A_0 常数；D_0 解离能；R 气体常数，可通过实验式 (6-14) 求得 D_0，若与手册中提供的金属氧化物解离能（键能）一致，说明原子化是高温热解。

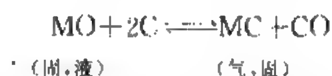
(3) 卤化物的原子化　卤化物的热分解反应可表示为



$$M_xX_y(固/液) \rightleftharpoons M_xX_y(气) \longrightarrow xM(气) + \frac{1}{2}yX_2$$

由于大部分的氯化物往往在原子化前就以氯化物挥发损失，故石墨炉原子吸收一般不用盐酸介质。

(4) 碳化物的形成　许多元素在高温下形成稳定的碳化物，即使在再高温度下也无法解离完全。



$$\underset{(固,液)}{MO}+2C \rightleftharpoons \underset{(气,固)}{MC}+CO$$

根据不同元素的原子化的反应机理和原子化难易程度可将元素分为三类：

容易原子化的元素：解离能低于 90kcal·mol⁻¹，原子化出现温度低于 1450K，包括的元素有 Na、K、Rb、Cs、Cu、Ag、Au、Zn、Cd、Hg、In、Tl、Sn、Pb、Bi、Se、Te 等。

中温原子化的元素：氧化物解离能为 (90～135) kcal·mol⁻¹，原子化出现温度 (1460～2100) K，包括的元素有 Li、Ga、As、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Pd、Be、Mg、Ca、Sr、Al、Ge、Pt、Eu、Yb 等。

难原子化元素：氧化物解离能为 (135～170) kcal·mol⁻¹，原子化出现温度为 (2100～2640) K，包括的元素有 Ti、Zr、V、Mo、Ru、Ir、Sc、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Lu、U、Ba、Si、Rh 等。

五、原子吸收光谱法中的干扰及消除方法

原子吸收法中遇到的干扰初步归纳起来有：化学干扰、电离干扰、背景吸收干扰、光谱干扰、物理干扰和其他干扰几种类型。

(一) 化学干扰

化学干扰是指在溶液或火焰气相中发生的对待测元素有影响的化学反应，通常导致待测元素离解或基态原子化的程度发生变化。这种影响可以是正效应，也可以是负效应。化学干扰是一种选择性的干扰效应，它不仅取决于待测元素和干扰元素的性质，还与火焰类型、火焰温度、火焰状态、观测部位、共存的其他组分、喷雾器的性能、燃烧器的类型和雾滴大小等有关。

化学干扰有不同的分类方法，一种分类是分为凝相干扰和气相干扰。凝相干扰是指干扰发生在熔滴蒸发为分子蒸气之前，大部分阴、阳离子对测定元素的干扰属此类干扰。气相干

扰是指干扰发生在样品蒸发为分子蒸气之后。典型的气相干扰是被测元素与氧形成难离解的氧化物分子蒸气。Alkemade 按溶质的蒸发情况，将化学干扰分为 4 类：①由于形成难挥发的化合物使吸收信号降低；②由于形成易挥发的化合物使吸收信号增加；③由于基体是难挥发的化合物，吸留或包夹待测元素使吸收信号降低；④由于被分析物质分散在易挥发的基体中使吸收信号增加。也有人将化学干扰分为“与浓度有关”和“与浓度无关”两类。所谓“与浓度无关的化学干扰”是指当待测元素的浓度变化时，一定量的干扰元素使不同浓度的待测元素吸光度下降或上升的比例是一定的。“与浓度有关的化学干扰”的干扰程度是随待测元素的浓度变化而改变。“与浓度无关的化学干扰”只影响工作曲线斜率，对其线性不影响，可用标准加入法消除其干扰。“与浓度有关的化学干扰”不仅影响工作曲线的斜率，还影响它的线性，不满足应用标准加入法的必要条件。

消除化学干扰的方法已有许多简单而有效的方法，但尚无一种通用的克服化学干扰的方法，需根据特定的分析对象设计干扰实验和消除干扰的方法，其中有如下几种方法。

（1）加入释放剂　加入释放剂与干扰离子生成更稳定或更难挥发的化合物，从而使被测元素从与干扰元素形成的化合物中释放出来。如文献中多用镧或锶作为测定钙、镁时的释放剂。

（2）加入保护剂　加入保护剂使待测元素不与干扰元素生成难挥发的化合物，从而使其不受干扰。保护剂可以是与待测元素形成稳定配合物（如加入 EDTA 抑制磷酸根对钙干扰）或是与干扰元素起作用（如 8-羟基喹啉消除铝对镁的干扰）。目前使用的保护剂有葡萄糖、蔗糖、乙二醇、甘油和甘露醇等。

（3）加入缓冲剂　在试样和标准溶液中均加入过量的某种元素使干扰影响不再变化，加入的过量的某种元素称缓冲剂。但这方法不仅使灵敏度显著降低，而且不是经常有效的。如用氧化亚氮-乙炔火焰测定钛，当铝量大于 $200mg \cdot L^{-1}$时，干扰趋于稳定。

（4）加入助熔剂　加入某些物质如氯化铵，它对一些高熔点被测物质起到助熔作用，有利于样品熔融蒸发，或有助于被测物转变为氯化物从而起到克服干扰，提高灵敏度的作用。

（5）利用高温火焰消除干扰　在低温火焰中出现的干扰在高温火焰中可部分或完全消除。

（6）选择适当的测定条件　选择适当的燃助比和燃烧器高度有助于减小或克服干扰。如经常利用还原性火焰夺取氧化物中氧的办法来提高原子化程度。在 N_2O-乙炔火焰的红羽毛区测定硅、钛、铝可使干扰现象大大减少；在空气-乙炔火焰中若燃烧器高度选择 20mm 则可以完全克服铁、铝、磷、钛对镁的干扰和铁、磷对钙的干扰，减少铝、钛对钙的干扰。

（7）改变介质、溶剂或改善喷雾器性能　改变溶液介质，如在高氯酸介质中测铬灵敏度较高，利用有机溶液喷雾，使溶液粘度和表面张力改变，有利于提高喷雾效率，也能改变火焰温度和气氛。

（8）化学分离　采用萃取，离子交换、沉淀法等分离干扰元素，还可起到浓缩作用。在许多情况下对分离要求不十分严格。但该法麻烦、费时和可能带来沾污。

（9）采用标准加入法　该法只能消除“与浓度无关的化学干扰”。为判断标准加入法测定结果的可靠性，可采用稀释法检查稀释前后未知样品的最终结果是否一致。

石墨炉原子吸收分析的化学干扰其实质和火焰中一样，是分析元素与某共存物形成了化合物。这种化学反应有的在室温时就已发生，有的在升温时发生。引起化学干扰者除共存元素外，还有石墨炉本身，这是火焰法中不存的。高温石墨炉中的化学干扰来自碳、气氛和基

体成分，它们与待测金属元素生成难解离的碳化物、氮化物、氧化物和易挥发的氯化物，从而产生干扰。为消除化学干扰，主要采用基体改进、平台原子化、涂层石墨管等技术。这些技术将在下一章介绍。

由于加入一种试剂抑制干扰的方法简单有效，因而得到普遍采用。已用作消除化学干扰的一些试剂列于表 6-3。

表 6-3　用于抑制干扰的一些试剂

试　剂	干扰成分	测定元素	试　剂	干扰成分	测定元素
La	Al，Si，PO_4^{3-}，SO_4^{2-}	Mg	NH_4Cl	Al	Na，Cr
Sr	Al，Be，Fe，Se，NO_3^-，SO_4^{2-}，PO_4^{3-}	Mg，Ca，Sr	NH_4Cl	Sr，Ca，Ba，PO_4^{3-}，SO_4^{2-}	Mo
			NH_4Cl	Fe，Mo，W，Mn	Cr
Mg	Al，Si，PO_4^{3-}，SO_4^{2-}	Ca	乙二醇	PO_4^{3-}	Ca
Ba	Al，Fe	Mg，K，Na	甘露醇	PO_4^{3-}	Ca
Ca	Al，F	Mg	葡萄糖	PO_4^{3-}	Ca，Sr
Sr	Al，F	Mg	水杨酸	Al	Ca
$Mg+HClO_4$	Al，Si，PO_4^{3-}，SO_4^{2-}	Ca	乙酰丙酮	Al	Ca
$Sr+HClO_4$	Al，P，B	Ca，Mg，Ba	蔗糖	P，B	Ca，Sr
Nd，Pr	Al，P，B	Sr	EDTA	Al	Mg，Ca
Nd，Sm，Y	Al，P，B，	Ca，Sr	8-羟基喹啉	Al	Mg，Ca
Fe	Si	Cu，Zn	$K_2S_2O_7$	Al，Fe，Ti	Cr
La	Al，P	Cr	Na_2SO_4	可抑制 16 种元素的干扰	Cr
Y	Al，B	Cr	$Na_2SO_4+CuSO_4$	可抑制 Mg 等十几种元素的干扰	Cr
Ni	Al，Si	Mg			
甘油、高氯酸	Al，Fe，Th，稀土，Si，B，Cr，Ti，PO_4^{3-}，SO_4^{2-}	Mg，Ca，Sr，Ba			

（二）**电离干扰**

由于某些易电离的元素在火焰中发生电离减少了参与原子吸收的基态原子数；反之，若火焰中存在能提供自由电子的其他易电离的元素，则使已电离的的原子回到基态，使参与原子吸收的基态原子数增加。因此电离干扰对测定结果的影响是有正的或负的之分。原子在火焰中的电离度与火焰温度和电离电位的关系用 Saha 公式表示：

$$\lg\frac{X^2}{1-X^2}=-\lg p-\frac{5404}{T}V_i+\frac{5}{2}\lg T-B \qquad (6\text{-}15)$$

式中，X 为电离度；p 为火焰气体中金属气体的分压；V_i 为金属原子的电离电位；T 为热力学温度；B 为常数。

由此可知火焰温度越高，元素的电离电位越低，电离度越大。电离干扰主要发生于电离电位较低的元素。如测定碱金属，使用高温火焰（如 N_2O-乙炔火焰）时，碱土金属和稀土元素也有显著电离。

某一元素的电离还与溶液的组成和它本身的浓度有关。原子在火焰中的电离可表示为



$$M \rightleftharpoons M^+ + e$$

达平衡时

$$K=\frac{[M^+][e]}{[M]}$$

电离度定义为已电离的金属正离子的浓度与该金属的总浓度之比，即 $X=[M^+]/[M]+[M^+]$。如火焰中只存在一种可电离的元素，则$[M^+]=[e]$于是有

$$\frac{X^2}{1-X}=\frac{K}{[M]+[M^+]}=\frac{K}{[M]_{总}} \qquad (6\text{-}16)$$

可见元素在火焰中的电离度与电离平衡常数 K 及原子在火焰中的总浓度有关。

碱金属、碱土金属和部分稀土元素，在常用的几种火焰中的电离度如表 6-4 所示。

表 6-4　部分金属元素在常用的几种火焰中的电离度

元素	电离电位/eV	电离度/%			元素	电离电位/eV	电离度/%		
		空气-丙烷	空气-乙炔	N_2O-乙炔			空气-丙烷	空气-乙炔	N_2O-乙炔
Li	5.4	0.6	5.2	63.8	La	5.61	—	—	40.0
Na	5.2	1.1	9.0	78.9	Eu	5.67	—	—	6.0
K	4.3	9.7	48.9	98.4	Gd	6.16	—	—	20.0
Rb	4.2	14.7	85.0	99.1	Dy	6.8	—		58.0
Cs	3.9	30.4	95.2	99.7	Ho	—			47
Be	9.3	<0.1	<0.1	0.1	Er	6.08	—	—	43
Mg	7.6	<0.1	<0.1	2.8	Tm	5.81	—	—	57
Ca	6.1	0.2	2.0	40.5	Yb	6.2	—		20
Sr	5.7	0.6	5.2	68.5	Lu	—	—	—	50
Ba	5.2		—	92.4	Nb	6.88	—	—	26
Al	5.98	—	—	14.0					

克服电离干扰的方法有两种，一是选择合适的火焰种类和火焰温度，二是加入消电离剂。一般的消电离剂的电离电位越低效果越好，常用的消电离剂有 CsCl、NaCl 和 KCl 等。有时加入的消电离剂的电离电位比待测元素的电离电位要高，但由于加入的浓度较大，仍可抑制电离干扰。但消电离剂的浓度不能太大，否则会产生基体效应或容易堵塞燃烧器缝口。

某些金属在 N_2O-乙炔火焰中的电离度及要完全消除电离干扰所需加入铯的量如表 6-5 所示。

表 6-5　某些金属在 N_2O-乙炔火焰中的电离干扰及其消除

元素及谱线 λ/nm	电离电位/eV	浓度/(μg·ml⁻¹)	电离度/%	完全消除干扰所需加入 Cs 的量(mg·L⁻¹)	吸光强度比[①](I^*/I)	元素及谱线 λ/nm	电离电位/eV	浓度/(μg·ml⁻¹)	电离度/%	完全消除干扰所需加入 Cs 的量(mg·L⁻¹)	吸光强度比[①](I^*/I)
Rb 420.2	4.18	20	99	10000	3.44	Tl 535.0	6.11	25	21	2000	1.08
K 769.9	4.34	20	99.7	10000	37.0	V 437.9	6.74	50		200	1.54
Na 589.6	5.11	2	83	10000	2.04	Cr 427.4	6.76	28	3	200	1.06
Ba 553.6	5.21	25	97	10000	3.13	Ti 351.3	6.82	25		200	1.34
Li 670.8	5.39	10	63	2000	1.18	Sn 286.3	7.34	25		200	5.88
Sr 460.7	5.69	20	95	10000	3.44	Pb 283.3	7.42	25	9	200	
In 451.1	5.78	25	18	2000	1.10	Mn 403.0	7.43	25	9	200	1.08
Al 396.1	5.98	25	49	2000	1.05	Mg 285.2	7.61	3	11	200	1.11
Ga 417.2	5.99	25	16	2000	1.32	Cu 324.7	7.72	20	12	200	1.06
Ca 422.7	6.11	5	83	2000	1.85	Fe 252.7	7.87	20	5	200	1.06

① I^*—加入 Cs 后的强度；I—未加入 Cs 时的强度；

（三）光谱干扰

光谱干扰主要来自吸收线重叠干扰，以及在光谱通带内多于一条吸收线和在光谱通带内存在光源发射的非吸收线等。

原子吸收光谱分析中吸收线重叠干扰比发射光谱要少得多。当被测元素中含有吸收线重叠的两种元素时，无论测定哪一种元素都将产生干扰，Co 253.649 对 Hg 253.652 的干扰是典型的吸收线重叠干扰的例子。干扰大小取决于吸收线重叠程度，当两元素吸收线的波长差等于或小于 0.03nm 时，认为吸收线重叠干扰是严重的。若当重叠的吸收线都是灵敏线时，即使相差 0.1nm，也明显显示出干扰。表 6-6 中列出了实际观察到的和理论上分析的吸收线相差 0.03nm 以下的可能发生吸收线重叠干扰的谱线。

表 6-6　光谱干扰线

元素	分析线 λ/nm	干扰线 λ/nm		元素	分析线 λ/nm	干扰线 λ/nm		元素	分析线 λ/nm	干扰线 λ/nm	
Ag	328.068	Rh	328.060	Hf	302.053	Fe	302.064	Sc	298.895	Ru	298.895
Al	308.215	V	308.211[①]	Hg	253.652	Co	253.649[①]		393.338	Ca	393.366
Au	242.795	Sr	242.810	I	206.17	Bi	206.16[①]	Si	250.690	V	250.690[①]
B	249.773	Ge	249.796	In	303.936	Ge	363.906		252.411	Fe	252.429
Bi	202.121	Au	202.138		325.856	Os	325.860	Sn	226.891	Al	226.910
Ca	422.673	Ge	422.657[①]	Ir	208.882	B	208.884		266.121	Ta	266.134
Cd	228.802	As	228.812[①]		248.118	W	248.144		270.851	Sc	270.677
Co	227.449	Re	227.462	La	370.454	V	370.470	Sr	421.552	Rb	421.556
	242.493	Os	242.497	Mn	403.307	Ga	403.298[①]	Ta	263.690	Os	263.713
	252.136	W	252.132	Mo	379.825	Nb	379.812		266.189	Ir	266.198
	252.136	In	252.137[①]	Os	247.684	Ni	247.687		269.131	Ge	269.134
	346.580	Fe	346.586		264.411	Ti	264.426	Ti	264.664	Pb	264.689
	350.228	Rh	350.252		271.464	Ta	271.467	Tl	291.832	Hf	291.858
	351.348	Ir	351.364		285.076	Ta	285.098		377.572	Ni	377.557
Cu	216.509	Pt	216.517		301.804	Hf	301.831	V	250.738	Ta	250.745
	324.754	Eu	324.753[①]	Pb	261.365	W	261.382		252.622	Ta	252.635
Fe	248.327	Sn	248.339	Pd	363.470	Ru	363.493	W	265.645	Ta	265.661
	271.903	Pt	271.904[①]	Pt	227.438	Co	227.449		271.890	Fe	271.903
	351.348	Ir	351.364	Rh	350.252	Co	350.262	Zn	386.387	Mo	386.411
Ga	294.418	W	294.440	Sb	217.023	Pb	216.999[①]		396.826	Ca	396.847
	403.298	Mn	403.307[①]		231.147	Ni	231.097[①]	Zn	213.856	Fe	213.859[①]
Hf	295.068	Nb	295.088	Sc	298.076	Hf	298.081	Zr	301.175	Ni	301.200

① 是文献上已观测到的干扰谱线，其余为理论上的干扰线。由于后者的灵敏度低或在测定条件下原子化效率低，故在通常测定中不表现干扰。

为排除这种干扰，一是选用被测元素的其他分析线，二是预先分离干扰元素。也可以利用这种现象测定高含量元素，而避免高倍稀释引入的误差。如已报道了利用 Ge 422.657 与 Ca 422.673nm的重叠，用 Ge 灯作光源测定高含量的钙。光谱重叠线的应用列于表 6-7。

表 6-7　光谱重叠线的应用

光源[①]	发射线 λ/nm	分析元素	吸收线 λ/nm	Δλ/nm	灵敏度/(μg·ml⁻¹)(1%)[②]
Al	308.215	V	308.211	0.004	800
As*	228.812	Cd	228.802	0.010	45
Cu	324.754	Eu	324.753	0.001	75
Fe	271.903	Pt	271.904	0.001	40
Fe	279.470	Mn	279.482	0.012	0.04
Fe	285.213	Mg	285.213	<0.001	10.0
Fe	287.417	Ga	287.424	0.007	250
Fe	324.728	Cu	324.754	0.026	0.8[②]
Fe	327.445	Cu	327.396	0.049	1.1[②]
Fe	338.241	Si	338.289	0.048	150
Fe	352.424	Ni	352.454	0.030	0.1[②]
Fe	396.114	Al	396.153	0.039	50
Fe	460.765	Sr	460.733	0.032	20
Ga	403.298	Mn	403.307	0.009	15
Ge	422.657	Ca	422.673	0.016	5
Hg	253.652	Co	253.649	0.003	100
Hg*	285.242	Mg	285.213	0.029	200
Hg*	359.348	Cr	359.349	0.001	250
I*	206.163	Bi	206.170	0.007	10
Mn	403.307	Ga	403.298	0.009	25
Ne	359.352	Cr	359.349	0.003	0.1[②]
Pb	241.173	Co	241.162	0.011	15
Pb	247.638	Pd	247.643	0.005	3.5
Sb	217.023	Pb	216.999	0.024	250
Sb	217.919	Co	217.894	0.025	100
Sb	231.147	Ni	231.059	0.052	35

续表

光源①	发射线 λ/nm	分析元素	吸收线 λ/nm	Δλ/nm	灵敏度/(μg·ml⁻¹)(1%)③
Sb	323.252	Li	323.261	0.009	200
Si	250.690	V	250.690	<0.001	65
Zn	213.856	Fe	231.859	0.03	200

① 光源中注*者为无极放电灯，其余为空心阴极灯。

② 为检出限值。

③ $\mu g \cdot ml^{-1}(1\%)$ 表示产生1%吸收信号（0.0044吸光度）所需要的待测元素浓度（$\mu g \cdot ml^{-1}$）。

在理想情况下，光谱通带内只存在一条吸收线。如果光谱通带内有几条吸收线，而且都参与吸收，例如在锰的最灵敏吸收线279.5nm近旁还有279.8nm和280.1nm两条灵敏度低的吸收线，当光谱通带为0.7nm时，它们也进入通带内，由于多重线各组分的吸收系数不一样，因此工作曲线为非线性的，而且由于多重线其他组分的吸收系数小于主吸收线的吸收系数，故测定灵敏度降低。上述干扰的消除可通过减小狭缝宽度的办法，但当两者的波长相差很小时，减小狭缝仍难消除，并使信噪比大大降低。

在光谱通带内存在光源发射的非吸收线，若它与分析用的谱线不能完全分开则产生干扰。造成这种干扰的原因有：①具有复杂光谱的元素本身就发射出单色仪不能完全分开的谱线，如铁、钴、镍等；②使用多元素空心阴极灯时，其他元素可能在分析线近旁发射出单色仪不能完全分开的谱线；③阴极材料中的杂质或充入的惰性气体产生的非吸收线所引起的干扰。

表6-8列出了由各种元素的空心阴极灯发射的氖谱线所引起的干扰。表6-9列出了要想把分析线与光源内可能产生的干扰谱线分开所必须采用的光谱通带。

表 6-8 必须分辨开的邻近氖发射线

分析线 λ/nm		氖线 λ/nm	所需分辨率 λ/nm	分析线 λ/nm		氖线 λ/nm	所需分辨率 λ/nm
Cr	359.349	359.353	0.002		369.236	369.420	0.09
	357.869	357.464	0.20	Ru	372.803	372.186	0.31
	360.533	360.017	0.25	Sc	402.369	401.264	0.94
Cu	324.754	323.238	0.75	Ag	338.289	337.828	0.23
Dy	404.599	404.264	0.16	Na	588.995	588.189	0.40
Er	337.276	336.991	0.14		589.592	588.189	0.70
Gd	371.748	372.186	0.21	Tm	371.792	372.186	0.19
	371.357	370.964	0.19	Ti	365.350	366.411	0.53
Li	670.784	335.505 二级为	0.11		364.268	363.367	0.45
		671.010			337.145	336.981	
Lu	335.956	336.063	0.05			336.991	0.077
Nb	405.894	404.264	0.81	U	358.488	359.353	0.43
Re	346.046	346.053	0.003		356.660	356.853	0.09
	346.473	346.658	0.09	Yb	346.436	346.658	0.11
	345.188	345.419	0.11	Zr	360.119	360.017	0.05
Rh	343.489	344.770	0.64		351.960	352.017	0.01

表 6-9 光源内的干扰谱线和需用通带

测定线 λ/nm		邻近辐射线 λ/nm		需用通带 λ/nm	测定线 λ/nm		邻近辐射线 λ/nm		需用通带 λ/nm
Ag	338.3	Ne	337.8	2.3	Cu	324.8	Ne	323.2	7.3
Au	242.8	Fe	242.82		Dy	404.6	Ne	404.2	1.6
Co	240.7	Co	240.4		Er	337.3	Ne	337.0	1.4
		Co	241.2		Ga	371.4	Ne	371.0	1.9
	341.3	Co	341.2		Ga	371.8	Ne	372.2	2.8
Cr	357.9	Ne	357.5	2	In	325.6	In	325.9	
		Ar	357.7		Ir	208.9	In	208.6	
Cr	359.35	Ne	359.35	0.02②		209.3	Ir	209.6	
	360.53	Ne	360.0	2.5	Li	670.8	Ne	671.0	1.1
		Ar	360.7		Lu	336.0	Ne	336.1	0.5

续表

测定线 λ/nm		邻近辐射线 λ/nm		需用通带 λ/nm	测定线 λ/nm		邻近辐射线 λ/nm		需用通带 λ/nm
Mn	279.5	Mn	279.8		Rh	369.2	Ne	369.4	0.9
		Mn	280.1		Ru	372.8	Ne	372.2	3
Na	589.0	Na	589.5		Sc	402.4	Ne	404.2	9.4
		Ne	588.2	4	Se	203.98	Cu	202.4	
	589.5	Ne	588.2	7	Si	251.6	Si	251.4	
Nb	405.9	Ne	404.3	8			Si	251.9	
Nd	468.3	Nd	468.4		Ta	227.6	Ta	227.5	
	492.5	Nd	492.5		Te	214.3	Te	214.2	
Ni	232.0	Ni	232.0		Ti	337.1	Ne	337.0	0.7
	233.7	Ni	233.8			364.3	Ne	363.4	4.5
	231.6	Ni	234.8			365.3	Ne	366.4	5.3
	234.8	Ni	234.7			374.1	Ti	374.1	
	339.1	Ni	339.3		Tm	371.8	Ne	372.9	1.9
	341.5	Ni	341.4		U	356.7	Ne	356.9	0.9
Pb	217.0	Ar	271.1			358.5	Ne	359.4	4.3
		Ne	217.6		V	306.6	V	306.7	
		Cu	216.5			370.4	V	370.5	
Pd	244.8	Pd	244.6			437.9	V	438.0	
			244.4		W	255.1	W	255.0	
			245.0		Yb	346.4	Ne	346.7	1
Re	345.2	Ne	345.4	1.1	Zr	301.2	Zr	301.3	
		Re	345.3			303.0	Zr	302.8	
	346.0	Ne	346.0	0.03①	Zr	354.8	Zr	354.9	
Re	345.9	Re	345.9			352.0	Ne	352.0	0.4
	346.5	Ne	346.5	0.9		360.1	Ne	360.0	0.5
Rh	343.5	Ne	344.1	2.8			Zr	359.9	

①光谱重叠。

消除这种干扰常用方法是减小狭缝宽度，使光谱通带小到足以分离掉非吸收线；亦可采用另外的吸收线。如Co240.725nm比252.136nm灵敏，但前者只允许用0.2nm的通带，而后者可允许用0.65nm的通带，信噪比比前者好。

Bowman等利用选择调制分离原子共振线的方法较好克服了光源发射的非吸收线的干扰。

（四）背景吸收

背景吸收是一种非原子吸收信号，包括光散射，分子吸收和火焰气体的吸收等。

分子吸收是原子化过程中生成的，如氧化物、卤化物、氢氧化物等气体分子吸收光源辐射所引起的干扰，它是由分子的电子光谱、振动光谱和转动光谱组成的带状光谱。表6-10列出了空气-乙炔火焰中一些元素分子吸收光谱的分布范围、最大吸收波长及其强弱程度。

表6-10　空气-乙炔火焰中的分子吸收光谱

分子吸收带		吸收波长范围/nm	λ_{max}/nm	强度①	分子吸收带		吸收波长范围/nm	λ_{max}/nm	强度①
Li	LiCl	190.0～270.0	226.0	B	K	KCl	190.0～285.0	243.0	B
	LiBr	190.0～310.0	190.0 250.0	B		KBr	200.0～320.0	210.0	B
	LiI	190.0～350.0	190.0 225.0	B		KI	190.0～380.0	190.0 240.0	B B
	LiOH	190.0～340.0	200.0 260.0	A		KOH	200.0～400.0	200.0 329.0	A
Na	NaCl	190.0～300.0	236.0	B	Rb	RbCl	190.0～295.0	190.0 250.0	B B
	NaBr	190.0～350.0	190.0 250.0	B		RbBr		215.0	B
	NaI	200.0～380.0	220.0	B					
	NaOH	200.0～400.0	234.0 332.0	A		RbI	190.0～380.0	190.0 245.0	B

续表

分子吸收带		吸收波长范围/nm	λ_{max}/nm	强度[①]
Cs	CsCl	190.0～285.0	190.0 248.0	B
	CsBr	190.0～330.0	190.0 275.0	B
	CsI	190.0～380.0	200.0 245.0	B
Be	BeO 或 BeOH	190.0～400.0	217.0	B
Mg	MgOH	200.0～400.0	270.0	B
Ca	CaO 或 CaOH CaOH	200.0～400.0 540.0～600.0	200.0 553.16	A A
Sr	SrO 或 SrOH	590.0～660.0 200.0～400.0	625.0 200.0	A
	SrOH	620.0～700.0	670.0	B
Ba	BaO 或 BaOH	200.0～350.0	200.0	A
La	LaO 或 LaOH	200.0～430.0	200.0	A
Ce	CeO?	200.0～400.0		B
Ti	TiO?	200.0～400.0		B
V	VO?	200.0～400.0	250.0 300.0	A
Cr	CrO	200.0～400.0	219.0 297.5	A
Mo	MoO?	200.0～380.0	208.0	

分子吸收带		吸收波长范围/nm	λ_{max}/nm	强度[①]
W		200.0～400.0	220.0	B
Mn	MnOH	200.0～400.0	256.0	A
Fe		200.0～400.0		B
Co		200.0～400.0		B
Ni		200.0～400.0		B
Pt		200.0～350.0	205.0	B
Au		200.0～400.0		B
Al	AlO?	200.0～430.0	241.0	A
Ga	GaCl GaO	200.0～300.0	240.0	A
In	InCl InO	200.0～340.0	267.0	A
C	C_2			B
Si	?	200.0～400.0	225.0	B
Sn	SnO	200.0～380.0	322.0	B
N	NO	190.0～230.0	214.9	B
P	PO	200.0～390.0	246.3	A
S	SO_2	180.0～350.0 200.0～400.0	207.0 —	B A
Tl	—	200.0～250.0	216.0	B

① A 表示吸收值大，B 表示中等程度吸收。

在石墨炉中，分子吸收是在灰化、原子化阶段，某些稳定的化合物以分子形式蒸发进入吸收区或某些化合物分解形成的小分子进入吸收区产生的。表 6-11 列出了部分盐类分子吸收波长范围及最大吸收波长。表中分子一列的含义是如 H_2SO_4 的吸收光谱，主要是 SO_2 产生的分子吸收，磷酸盐的吸收光谱是磷的氧化物的分子吸收。

表 6-11　部分盐类分子吸收波长范围及最大吸收波长

化合物	吸收波长范围/nm	分子式	λ_{max}/nm	化合物	吸收波长范围/nm	分子式	λ_{max}/nm
H_2SO_4	190～330	SO_2	200	MgF_2	220～360	MgF	235,269,358
HNO_3	190～240	NO	205,215	$MgCl_2$	200～300	MgCl	270,377
H_3PO_4	190～300(弱)	P_xQ_y		CaF_2	300～330	CaF	331,325
Na_2HPO_4	190～350(强)	P_xO_y,P_2		$CaCl_2$	190～300	CaCl	214
Ha_2SO_4	190～350	SO_2	200	$SrCl_2$	190～300	SrCl	219
		SQ		$BaCl_2$	190～300	BaCl	220
$NaNO_3$	190～500	NO	205,215	$CdCl_2$	200～270		210
		NO_2		$Al(NO_3)_3$	200～280	AlO	214,254
LiCl	190～280	LiCl	226	Al-NaBr	276～284	AlBr	279,280
LiBr	190～310	LiBr	250	Al-NaCl	258～265	AlCl	261,262
LiI	190～350	LiI	225	Al-NaF	227[①]	AlF	226,227
NaCl	190～310	NaCl	240	$Ga(NO_3)_3$	190～280	CaO	240
NaBr	190～350	NaBr	250	$GaCl_3$	241～270	CaCl	247
NaI	200～380	NaI	220,234	$GaBr_3$	265[①]	CaBr	265
KCl	190～300	KCl	195,244	Ga-NaF	209～220	GaF	211
KBr	200～330	KBr	254,274		292～305		
KI	190～380	KI	240	$In(NO_3)_3$	206—350	InO	206,270
RbCl	190～295	RbCl	250	$InCl_3$	265～296	InCl	266,267
RbBr	190～325	RbBr	215	InF_3	227～253	InF	234
RbI	190～380	RbI	245	In-NaBr	285～308	InBr	284
CsCl	190～285	CsCl	248	TlCl	190～290	TlCl	252,311
CsBr	190～330	CsBr	275		305～330		323
CsI	190～380	CsI	245	$SnCl_2$	190～350	SnCl	198,323
$BeCl_2$	357	BeCl	357	$PbCl_2$	200～300		
BeF_2	300～400	BeF	301				

① 吸收波长的中心位置。

散射背景是指原子化过程中产生的固体微粒对光源辐射光的散射而形成的假吸收。当基体浓度大时，由于热量不足，基体物质不能全部蒸发，一部分以固体微粒状态存在。微粒散射光强度与微粒本身的大小和入射光的波长有关，当微粒的直径小于入射光的波长的$^1/_{10}$时，服从瑞利散射定律：

$$I_{散}=24\pi^3\frac{NV^3}{\lambda^{-4}} \tag{6-17}$$

式中，$I_{散}$为散射光强度；N为产生散射光的微粒数；λ为入射光的波长；V为微粒的体积。散射光强和波长的四次方成反比。随着微粒直径的增大，不再遵守瑞利散射定律，而是遵守米氏散射定律，即散射强度与波长无关。

散射对吸收线位于短波区的元素的测定影响较大，当基体浓度高时，或使用长光程火焰、发亮火焰或全消耗火焰进行测定时，更要注意散射的影响。

在原子吸收光谱法中，由分子吸收和光散射产生的表观的虚假吸收可以采用各种背景校正技术消除，最常用的一种是连续光源法（氘灯法），即用氘灯测定背景吸收，再从测得的表观总吸收值中减去背景吸收值，得到真实吸收值；另一种常用的方法是利用塞曼效应校正背景的方法。其他较常用的还有双波长法、共振线吸收法、时间分辨测光法和波长调制法等。（以上方法将在第七章原子吸收光谱分析中的背景校正技术一节中作较详细的介绍）以上各种背景校正技术都为光学方法，其他的方法还有如石墨炉原子吸收中增加灰化温度、加入基体改进剂。利用电容放电高速加热和平台技术、在灰化阶段引入氧气和采用适当的升温程序等。在火焰原子吸收中采用高温火焰和用与试样溶液相似成分的标准溶液做工作曲线的方法来消除背景吸收干扰。

（五）物理干扰

物理干扰是指试样在转移、蒸发和原子化过程中，由于试样任何物理性质的变化而引起吸收强度变化的效应。

在火焰原子吸收中，由于溶质的浓度和溶剂的变化引起的粘度和表面张力的变化，使进样速度和喷雾效率发生改变，影响到吸收强度。通常使用有机溶剂可以提高测定的灵敏度的原因就是利用了这种物理干扰。

在无火焰原子吸收中物理干扰包括：①进样，进样体积大小，位置和几何形状都会产生影响；②记忆效应，待测元素残留在原子化器中造成的积累干扰称作记忆效应；③石墨管表面状态改变，在使用过程中使其表面变得疏松多孔导致样品流失和渗透，使扩散损失增大；④冷凝作用，石墨管中央温度高而两端低，当原子化蒸气从高温区向低温区迁移时，可能发生原子蒸气的冷凝。

火焰法中消除物理干扰的方法有：①配制与被测试样组成相似的标准溶液；②当样品溶液浓度较高时，可稀释样品溶液；③用多道原子吸收分光光度计时，采用内标法；④采用标准加入法。

在无火焰原子吸收法中消除物理干扰的方法有：采用自动进样器以保证进样条件一致；为减少记忆效应而提高原子化温度和延长原子化时间，在一次测量之后用空烧或增加一步高温清洗，采用涂层石墨管；为减少石墨炉产生的误差要经常校正，发现不适于定量时及时更换石墨管；为避免冷凝作用在紧贴原子化器的有限范围内测定，或采用氩-氢混合气作载气。

第二节 原子吸收光谱法常用基本数据

一、元素共振线的跃迁谱项

对于非过渡元素原子吸收共振线的相应谱项，可由它的原子电子构型推导出来。一般先把基态的 L、S、J 求出来，得到基态谱项。然后，根据选择定则求出激发态的 L、S、J，这就求出共振跃迁相应的激发态谱项。例如钠的电子构型是（Ar）3s，即在主量子数 3 层有一个电子，于是 $L=0$，$S=\frac{1}{2}$，$J=L+S=\frac{1}{2}$，它的基态谱项为 $3^2S_{1/2}$，由选择原则，它的共振跃迁必定是 P 态，多重性仍为 $2S+1=2$，但 J 有两个不同的值，即 $1+\frac{1}{2}=\frac{3}{2}$，$1-\frac{1}{2}=\frac{1}{2}$，激发态谱项为 $3^2P_{1/2}$ 和 $3^2P_{3/2}$。两种不同的共振跃迁 $3^2S_{1/2}-3^2P_{1/2}$ 及 $3^2S_{1/2}-3^2P_{3/2}$ 产生 589.592nm 及 588.905nm 波长波线。

表 6-12 中给出原子基态的电子构型、电子跃迁以及相应于这跃迁所产生的谱线波长。

表 6-12 元素共振线的跃迁谱项[6]

元素		电子构型	基态光谱项	共振跃迁	λ/nm
第 1 族					
	Li	(He) 2s	$2^2S_{1/2}$	2s—2p	670.78
	Na	(Ar) 3s	$3^2S_{1/2}$	3s—3p	588.995
					589.592
	K	(Kr) 4s	$4^2S_{1/2}$	4s—4p	766.491
					769.898
	Rb	(Xe) 5s	$5^2S_{1/2}$	5s—5p	852.110
					894.350
第 2 族					
	Be	$1s^22s^2$	2^1S_0	$2s^2$—2s2p	234.861
	Mg	(Ne) $3s^2$	3^1S_0	$3s^2$—3s3p	285.213
	Ca	(Ar) $4s^2$	4^1S_0	$4s^2$—4s4p	422.673
	Sr	(Kr) $5s^2$	5^1S_0	$5s^2$—5s5p	460.733
	Ba	(Xe) $6s^2$	6^1S_0	$6s^2$—6s6p	553.548
第 3 族					
	Sc	(Ar) $3d4s^2$	$4^2D_{3/2}$	$4s^2$—4s4p	399.661
					402.040
					402.369
					404.779
	Y	(Kr) $4d5s^2$	$5^2D_{3/2}$	$5s^2$—5s5p	403.983
					412.831
					414.285
					423.594
	La	(Xe) $5d6s^2$	$6^2D_{3/2}$	$6s^2$—6s6p	515.869
					545.515
					550.134
					583.979
第 4 族					
	Ti	(Ar) $3d^24s^2$	4^3F_2	$4s^2$—4s4p	263.154
					263.242
					264.426
					264.664
	Zr	(Kr) $4d^25s^2$	5^3F_2	$5s^2$—5s5p	298.539
					351.960
	Hf	(Xe) $5d^26s^2$	4^3F_2	$6s^2$—（6s6p）	307.288
					286.637
第 5 族					
	V	(Ar) $3d^34s^2$	$4^4F_{3/2}$	$4s^2$—4s4p	318.540
					318.341

续表

元　　素	电子构型	基态光谱项	共振跃迁	λ/nm
第 5 族				
				318.398
Nb[①]	(Kr) $4d^45s$	$^6D_{1/2}$	5s—5p	407.973
				405.894
Ta	(Xe) $5d^36s^2$	$6^4F_{3/2}$	$6s^2$—6s6p	271.467
				277.588
第 6 族				
Cr	(Ar) $3d^54s$	4^7S_3	$3d^54s$—$3d^44s4p$	357.869
				359.349
				360.533
Mo	(Kr) $4d^55s$	5^7S_3	$4d^55s$—$4d^45s5p$	313.259
				317.033
				319.397
W	(Xe) $5d^46s^2$	$^5D_0$	$6s^2$—6s6p	255.135
第 7 族				
Mn	(Ar) $3d^54s^2$	$4^6S_{5/2}$	$4s^2$—4s4p	279.482
				279.827
				280.106
Tc	(Kr) $4d^55s^2$	$5^6S_{5/2}$	?	?
Re	(Xe) $5d^56s^2$	$6^6S_{5/2}$	$6s^2$—6s6p	345.188
				346.046
				346.473
第 8 族				
Fe	(Ar) $3d^64s^2$	4^5D_4	$4s^2$—4s4p	248.327
				252.285
Ru	(Kr) $4d^75s$	$^5F_5$	5s—5p	372.803
				349.894
Os	(Xe) $5d^66s^2$	6^5D_4	$6s^2$—6s6p	290.906
				305.866
第 9 族				
Co	(Ar) $3d^74s^2$	$4^4F_{9/2}$	$4s^2$—4s4p	242.493
				238.486
Rh	(Kr) $4d^85s$	$5^4F_{9/2}$	5s—5p	343.489
Ir	(Xe) $5d^76s^2$	$6^4F_{9/2}$	$6s^2$—6s6p	208.882
第 10 族				
Ni	(Ar) $3d^84S^2$	4^3F_4	$4s^2$—4s4p	232.003
Pd	(Kr) $4d_{10}$	$^1S_0$	$4d^{10}$—$4d^95p$	244.791
Pt	(Xe) $5d^96s$	$^3D_3$	6s—6p	265.945
第 11 族				
Cu	(Ar) $3d^{10}4s$	$4^2S_{1/2}$	4s—4p	324.754
				327.396
Ag	(Kr) $4d^{10}5s$	$5^2S_{1/2}$	5s—5p	328.068
				338.289
Au	(Xe) $5d^{10}6s$	$6^2S_{1/2}$	6s—6p	242.796
				267.595
第 12 族				
Zn	(Ar) $3d^{10}4s^2$	4^1S_0	$4s^2$—4s4p	213.856
Cd	(Kr) $4d^{10}5s^2$	5^1S_0	$5s^2$—5s5p	228.802
Hg	(Xe) $4f^{14}5d^{10}6s^2$	6^1S_0	$6s^2$—6s6p	(紫外真空)
第 13 族				
B	$1s^22s^22p$	$2^2P_{1/2}$	2p—3s	249.772
				249.677
			$2s^22p$—$2s2p^2$	208.957
				208.334
Al	(Ne) $3s^23p$	$3^2P_{1/2}$	3p—4s	396.152
				394.401
			3p—3d	308.215
				309.271
				309.284
Ga	(Ar) $3d^{10}4s^24p$	$4^2P_{1/2}$	4p—5s	403.298

续表

元素	电子构型	基态光谱项	共振跃迁	λ/nm
第13族				
Ga	(Ar) $3d^{10}4s^24p$	$4^2P_{1/2}$	4p—5s	417.206
			4p—4d	287.424
				294.364
				294.418
In	(Kr) $4d^{10}5s^25p$	$5^2P_{1/2}$	5p—6s	410.176
				451.131
			5p—5d	303.936
				325.609
				325.856
Tl	(Xe) $4f^{14}5d^{10}6s^26p$	$6^2P_{1/2}$	6p—7s	377.572
				535.046
			6p—6d	276.787
				351.924
				352.943
第14族				
C	$1s^22s^22p^2$	2^3P_0	$2s^22p^2$—$2s2p^3$	(紫外真空)
Si	(Ne) $3s^23p^2$	3^3P_0	$3p^2$—$3p4s$	250.590
				251.432
				251.611
				251.920
				252.411
				252.851
Ge	(Ar) $3d^{10}4s^24p^2$	4^3P_0	$4p^2$—$4p5s$	259.254
				265.118
				265.158
				269.134
				270.963
				275.459
Sn	(Kr) $4d^{10}5s^25p^2$	5^3P_0	$5p^2$—$5p6s$	270.651
				283.999
				286.333
				300.914
				303.412
				317.505
Pb	(Xe) $4f^{14}5d^{10}6s^26p^2$	6^3P_0	$6p^2$—$6p7s$	283.306
				363.958
				368.348
				405.783
第15族				
N	$1s^22s^22p^3$	$2^4S_{3/2}$	$2p^3$—$2p^23s$	(紫外真空)
P	(Ne) $3s^23p^3$	$3^4S_{3/2}$	$3p^3$—$3p^24s$	177.999
				178.287
				178.768
As	(Ar) $3d^{10}4s^24p^3$	$4^4S_{3/2}$	$4p^3$—$4p^25s$	193.693
				197.197
Sb	(Kr) $4d^{10}5s^25p^3$	$5^4S_{3/2}$	$5p^3$—$5p^26s$	206.833
				217.581
				231.147
Bi	(Xe) $4f^{14}5d^{10}6s^26p^3$	$6^4S_{3/2}$	$6p^3$—$6p^27s$	306.772
第16族				
O	$1s^22s^22p^4$	2^3P_2	$2p^4$—$2p^32s$	(紫外真空)
S	(Ne) $3s^23p^4$	3^3P_2	$3p^4$—$3p^34s$	180.734
				182.036
				182.626
Se	(Ar) $3d^{10}4s^24p^4$	4^3P_2	$4P^4$—$4p^35s$	196.026
				203.985
				206.279
Te	(Kr) $4d^{10}5s^25p^4$	5^3P_2	$5p^4$—$5p^36s$	214.275
				238.325
				238.576

① 这是原子基态中的反常现象。V、Ta 的$^6D_{1/2}$谱项接近基态，Nb 的$^4F_{3/2}$谱项接近基态。

二、部分原子吸收线的振子强度

表 6-13 部分原子吸收线的振子强度

元素	吸收线 λ/nm	振子强度	元素	吸收线 λ/nm	振子强度	元素	吸收线 λ/nm	振子强度
Ag	328.07	0.46	Cr	357.87	0.3	Na	589.00	0.655
	338.29	0.22		425.44	0.08		589.59	0.327
Al	309.27	0.16	Cs	852.11	0.73		330.24	0.0094
	309.28	0.18		893.45	0.36		330.30	0.0048
	396.15	0.12		455.54	0.017	Ni	341.48	0.14(? 0.3)
	237.31	0.11	Cu	324.75	0.32(? 0.43)	P	177.50	0.15
	237.34	0.012		327.40	0.16	Pb	283.31	0.20
	256.80	0.044	Fe	371.99	0.035	Rb	780.02	0.675
Au	242.80	0.29	Ga	287.42	0.32		794.76	0.335
	267.60	0.13	Hg	253.65	0.025		420.18	0.015
B	249.77	0.11	In	303.94	0.28	S	181.37[b]	0.12
	249.68	0.11		410.48	0.12	Sb	231.15	0.04
Ba	553.55	1.5	K	766.49	0.682	Si	251.61	0.12
Be	234.86	1.36		769.90	0.339	Sn	286.33	0.19
Be^+	313.06	0.505		404.41	0.0061	Sr	460.73	1.55
Bi	306.77	0.12		404.72	0.00305	Te	225.90	0.0018
C	165.72	0.17	Li	670.78	0.753	Ti	364.27	0.14
Ca	422.67	1.75		323.26	0.00552		399.86	0.09
	239.86	0.0433	Mg	285.21	1.81	Tl	276.79	0.30
Ca^+	393.37	0.69		202.58	0.22		377.57	0.13
	396.85	0.344	Mg^+	279.55	0.920	V	318.40	0.7
Cd	228.80	1.3		280.27	0.313		437.92	0.25
	326.11	0.001	Mn	279.48	0.57		390.22	0.04
Co	304.40	0.023		403.08	0.056	Zn	213.86	1.5
	346.58	0.018	Mo	313.26	0.2		307.59	0.00013

三、原子吸收光谱分析中元素主要吸收线及相对灵敏度

表 6-14 原子吸收光谱分析中元素主要吸收线及相对灵敏度[7]

元素	吸收线 λ/nm	相对灵敏度	元素	吸收线 λ/nm	相对灵敏度	元素	吸收线 λ/nm	相对灵敏度
Ag	328.1	1.0	Cr	357.8	1.0		394.6	6.5
	338.3	1.9		360.5	2.2	Ge	265.1	1.0
Al	309.3	1.0		428.9	4.5		269.1	3.8
	396.2	1.1	Cs	852.1	1.0	Hf	286.6	
	394.4	2.4		455.5	85	Hg	253.6	
	236.7	6.3	Cu	324.7	1.0	Ho	410.4	1.0
As	193.7	1.0		216.5	6.0		404.1	5.2
	197.2	2.0		224.4	157		412.7	11
Au	242.8	1.0	Dy	421.2	1.0		395.5	45
	267.6	1.8		419.5	1.6	In	303.9	1.0
B	249.68			416.8	6.8		325.6	1.0
Ba	553.55	1.0	Er	400.8	1.0		256.0	12
	3501.1	16		389.3	5.0		275.4	29
Be	234.86			390.5	20	Ir	263.9	1.0
Bi	233.0	1.0	Eu	459.4			254.4	2.1
	222.8	2.4	Fe	248.3	1.0		351.3	8.6
	306.7	3.7		371.9	5.7	K	766.5	1.0
Ca	422.7	1.0		373.7	10		769.9	2.3
	239.8	120		346.5	110		404.4	500
Cd	228.8	1.0	Ga	287.4	1.0	La	550.1	1.0
	326.1	435		294.4	1.0		357.4	4.0
Co	240.7	1.0		245.0	9.6		392.8	4.0
	252.1	2.0		271.9	20	Li	670.8	1.0
	304.4	12	Gd	407.8	1.0		823.3	235
	346.5	30		368.4	1.1	Lu	336.0	1.0

续表

元素	吸收线 λ/nm	相对灵敏度	元素	吸收线 λ/nm	相对灵敏度	元素	吸收线 λ/nm	相对灵敏度
Lu	337.7	2.0	Pr	502.7	2.5		293.4	2.5
	451.9	11		503.3	3.7	Tb	432.7	1.0
Mg	285.2	1.0	Pt	265.9	1.0		410.5	3.6
	202.5	24		248.7	5.0	Tc	261.4	1.0
Mn	279.5	1.0		271.9	8.2		261.6	1.0
	280.1	1.9	Rb	780.0	1.0		318.2	10
	403.1	9.5		420.2	120		317.3	100
Mo	313.3	1.0	Re	346.1	1.0	Te	214.3	1.0
	315.8	4.0		345.2	2.4		225.9	15
	311.2	20	Rh	343.5	1.0	Ti	365.4	1.0
Na	589.0	1.0		365.8	6.0		364.3	1.1
	589.6	1.0		350.7	45	Tl	276.8	1.0
	330.2	185	Ru	349.8	1.0		238.0	6.7
Nb	334.4	1.0		379.9	2.2	Tm	371.8	1.0
	357.6	2.5		392.6	11		420.4	3.0
	415.3	5.1	Sb	217.6	1.0	U	58.5	1.0
Nd	463.4	1.0		231.2	2.1		351.5	2.8
	471.9	2.1	Sc	394.2	1.0	V	318.3	1.0
Ni	232.0	1.0		390.8	1.0		318.5	1.0
	305.1	4.5		327.4	12		390.2	6.5
	303.7	12	Se	196.6	1.0	W	400.8	1.0
	294.4	54		204.0	3.0		255.1	0.5
Os	290.9	1.0		207.5	35		283.1	1.0
	301.8	3.2	Si	251.6	1.0	Y	410.2	1.0
	426.1	30		252.9	3.2		362.1	2.0
P	213.8	1.0		221.1	8	Yb	398.8	1.0
Pb	283.3	1.0	Sm	429.7	1.0		246.5	7.5
	217.0	0.4		472.8	2.0		267.2	40
	261.4	10	Sn	224.6	1.0	Zn	213.9	1.0
	368.4	25		254.7	5.4		307.6	4700
Pd	247.6	1.0		266.1	29	Zr	360.1	1.0
	340.5	3.0	Sr	460.7			298.5	1.7
Pr	495.1	1.0	Ta	274.2	1.0		362.4	1.9

四、谱线宽度数据

在火焰条件下碰撞截面积的实验测量范围为（5.0～12.0）nm，表 6-15～表 6-17 中 $\delta\lambda_c$（低）指截面积 5.0nm，$\delta\lambda_c$（高）指截面积 12.0nm，$\delta\lambda_D$ 是多普勒宽度。谱线总宽度 $\delta\lambda_T$ 是按下式计算的：

$$\delta\lambda_T=\frac{\delta\lambda_c}{2}+\sqrt{\frac{\delta\lambda_c}{2}+\delta\lambda_D^2}$$

（一）空气-乙炔火焰谱线宽度数据

表 6-15 空气-乙炔火焰谱线宽度数据[6]

元 素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_c$(低)/nm	$\delta\lambda_c$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
Ag	328.068	0.0011	0.0008	0.0020	0.0016	0.0025
	338.289	0.0012	0.0009	0.0021	0.0017	0.0026
Al	309.271	0.0021	0.0009	0.0022	0.0026	0.0035
	309.284	0.0021	0.0009	0.0022	0.0026	0.0035
	394.401	0.0027	0.0015	0.0036	0.0036	0.0051
	396.152	0.0027	0.0015	0.0037	0.0036	0.0051
As	193.696	0.0008	0.0003	0.0007	0.0010	0.0012
	197.197	0.0008	0.0003	0.0007	0.0010	0.0013
	234.984	0.0010	0.0004	0.0011	0.0012	0.0016

续表

元素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_L$(低)/nm	$\delta\lambda_L$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
As	249.291	0.0010	0.0005	0.0012	0.0013	0.0018
	286.044	0.0012	0.0007	0.0016	0.0015	0.0022
	289.871	0.0012	0.0007	0.0016	0.0016	0.0022
Au	242.795	0.0006	0.0004	0.0010	0.0009	0.0013
	267.595	0.0007	0.0005	0.0013	0.0010	0.0015
B	249.677	0.0027	0.0008	0.0019	0.0031	0.0038
	249.772	0.0027	0.0008	0.0019	0.0031	0.0038
Ba	455.403	0.0014	0.0016	0.0037	0.0024	0.0042
	553.548	0.0017	0.0023	0.0055	0.0032	0.0060
Be	234.861	0.0028	0.0008	0.0018	0.0032	0.0038
Bi	206.170	0.0005	0.0003	0.0007	0.0007	0.0010
	223.061	0.0005	0.0004	0.0009	0.0008	0.0011
	302.464	0.0007	0.0007	0.0016	0.0011	0.0019
	306.772	0.0008	0.0007	0.0016	0.0012	0.0019
	472.219	0.0012	0.0016	0.0039	0.0022	0.0042
Ca	393.366	0.0022	0.0014	0.0033	0.0030	0.0044
	422.673	0.0024	0.0016	0.0038	0.0033	0.0049
Cd	228.802	0.0008	0.0004	0.0010	0.0010	0.0014
	326.106	0.0011	0.0008	0.0019	0.0016	0.0024
Co	240.725	0.0011	0.0005	0.0012	0.0014	0.0018
	242.493	0.0011	0.0005	0.0012	0.0014	0.0018
	252.897	0.0012	0.0005	0.0013	0.0015	0.0020
	345.350	0.0016	0.0010	0.0024	0.0022	0.0032
	352.685	0.0016	0.0010	0.0025	0.0022	0.0033
	425.231	0.0020	0.0015	0.0036	0.0028	0.0045
Cr	357.869	0.0018	0.0011	0.0026	0.0024	0.0035
	359.349	0.0018	0.0011	0.0026	0.0024	0.0035
	425.436	0.0021	0.0015	0.0037	0.0030	0.0046
	520.604	0.0026	0.0023	0.0055	0.0039	0.0065
Cs	852.110	0.0026	0.0054	0.0131	0.0065	0.0136
	894.350	0.0028	0.0060	0.0144	0.0071	0.0149
Cu	324.754	0.0014	0.0009	0.0021	0.0019	0.0028
	327.396	0.0015	0.0009	0.0021	0.0020	0.0028
Fe	248.327	0.0012	0.0005	0.0012	0.0015	0.0019
	248.975	0.0012	0.0005	0.0012	0.0015	0.0020
	371.994	0.0018	0.0012	0.0028	0.0024	0.0036
	385.991	0.0018	0.0012	0.0030	0.0026	0.0039
Ga	287.424	0.0012	0.0007	0.0016	0.0016	0.0023
	294.364	0.0012	0.0007	0.0017	0.0016	0.0023
	294.418	0.0013	0.0007	0.0017	0.0016	0.0023
	417.206	0.0018	0.0014	0.0034	0.0026	0.0041
Ge	206.865	0.0009	0.0003	0.0008	0.0010	0.0014
	265.118	0.0011	0.0006	0.0014	0.0014	0.0020
	265.158	0.0011	0.0006	0.0014	0.0014	0.0020
Hf	286.637	0.0048	0.0006	0.0014	0.0011	0.0018
	307.288	0.0008	0.0007	0.0017	0.0012	0.0020
	368.224	0.0010	0.0010	0.0024	0.0016	0.0027
Hg	253.652	0.0006	0.0005	0.0011	0.0009	0.0014
In	303.936	0.0010	0.0007	0.0017	0.0014	0.0022
	325.609	0.0011	0.0008	0.0019	0.0016	0.0024
	410.176	0.0014	0.0013	0.0031	0.0021	0.0036
	451.131	0.0015	0.0015	0.0037	0.0025	0.0042
Ir	208.882	0.0005	0.0003	0.0008	0.0007	0.0010
	254.397	0.0007	0.0005	0.0011	0.0009	0.0014
	263.942	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0015
	263.971	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0015
	380.012	0.0010	0.0011	0.0025	0.0016	0.0029
K	766.491	0.0043	0.0052	0.0126	0.0077	0.0139

续表

元素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_c$(低)/nm	$\delta\lambda_c$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
K	769.898	0.0044	0.0053	0.0127	0.0077	0.0140
La	418.732	0.0013	0.013	0.0031	0.0021	0.0036
	545.515	0.0016	0.0022	0.0053	0.0031	0.0058
	550.134	0.0017	0.0023	0.0054	0.0031	0.0059
	576.934	0.0017	0.0025	0.0060	0.0034	0.0064
	657.851	0.0020	0.0032	0.0078	0.0042	0.0082
Li	323.263	0.0044	0.0016	0.0038	0.0052	0.0067
	670.780	0.0090	0.0069	0.0165	0.0131	0.0205
Mg	285.213	0.0021	0.0008	0.0019	0.0025	0.0032
Mn	279.482	0.0013	0.0007	0.0016	0.0017	0.0023
	279.827	0.0013	0.0007	0.0016	0.0017	0.0023
	280.106	0.0013	0.0007	0.0016	0.0017	0.0023
	403.076	0.0019	0.0014	0.0033	0.0027	0.0042
	403.307	0.0019	0.0014	0.0033	0.0027	0.0042
	403.449	0.0019	0.0014	0.0033	0.0027	0.0042
Mo	313.259	0.0011	0.0008	0.0018	0.0016	0.0024
	317.035	0.0011	0.0008	0.0019	0.0016	0.0024
	379.825	0.0014	0.0011	0.0027	0.0020	0.0033
	386.411	0.0014	0.0012	0.0028	0.0021	0.0034
	390.296	0.0014	0.0012	0.0028	0.0021	0.0034
Na	588.995	0.0044	0.0035	0.0084	0.0065	0.0103
	589.592	0.0044	0.0035	0.0085	0.0065	0.0103
Nb	334.910	0.0012	0.0009	0.0021	0.0017	0.0027
	405.894	0.0015	0.0013	0.0031	0.0023	0.0037
	407.973	0.0015	0.0013	0.0031	0.0023	0.0037
Ni	231.096	0.0011	0.0004	0.0011	0.0013	0.0017
	232.003	0.0011	0.0004	0.0011	0.0013	0.0017
	341.476	0.0016	0.0010	0.0023	0.0021	0.0031
	352.454	0.0016	0.0010	0.0025	0.0022	0.0033
Os	290.906	0.0007	0.0006	0.0015	0.0011	0.0018
	442.047	0.0011	0.0014	0.0034	0.0021	0.0038
Pb	216.999	0.0005	0.0003	0.0008	0.0007	0.0011
	283.306	0.0007	0.0006	0.0014	0.0010	0.0017
	368.348	0.0009	0.0010	0.0024	0.0015	0.0027
	405.783	0.0010	0.0012	0.0029	0.0018	0.0032
Pd	244.791	0.0008	0.0005	0.0011	0.0011	0.0016
	247.642	0.0009	0.0005	0.0011	0.0011	0.0016
	340.458	0.0012	0.0009	0.0021	0.0017	0.0026
	360.955	0.0012	0.0010	0.0024	0.0018	0.0029
	363.470	0.0012	0.0010	0.0024	0.0019	0.0030
Pt	265.945	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0015
	306.471	0.0008	0.0007	0.0016	0.0012	0.0020
Rb	780.023	0.0030	0.0048	0.0115	0.0062	0.0122
	794.760	0.0030	0.0050	0.0119	0.0064	0.0126
Re	228.751	0.0006	0.0004	0.0009	0.0008	0.0012
	346.046	0.0009	0.0009	0.0021	0.0014	0.0024
	346.473	0.0009	0.0009	0.0021	0.0014	0.0024
Rh	343.489	0.0012	0.0009	0.0022	0.0017	0.0027
	369.236	0.0013	0.0010	0.0025	0.0019	0.0031
	437.480	0.0015	0.0015	0.0035	0.0024	0.0041
Ru	349.894	0.0012	0.0009	0.0023	0.0018	0.0028
	372.803	0.0013	0.0011	0.0026	0.0020	0.0031
Sb	206.833	0.0007	0.0003	0.0008	0.0008	0.0012
	217.581	0.0007	0.0004	0.0009	0.0009	0.0012
	231.147	0.0007	0.0004	0.0010	0.0010	0.0014
	259.805	0.0008	0.0005	0.0012	0.0011	0.0016
Sc	390.749	0.0021	0.0013	0.0032	0.0028	0.0042
	391.181	0.0021	0.0013	0.0032	0.0028	0.0042
	402.040	0.0021	0.0014	0.0034	0.0029	0.0044

续表

元素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_L$(低)/nm	$\delta\lambda_L$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
Sc	630.567	0.0033	0.0035	0.0083	0.0055	0.0095
Se	196.026	0.0008	0.0003	0.0007	0.0009	0.0012
	203.985	0.0008	0.0003	0.0008	0.0010	0.0013
Si	251.611	0.0017	0.0006	0.0015	0.0020	0.0026
Sn	224.605	0.0007	0.0004	0.0009	0.0009	0.0013
	235.484	0.0008	0.0004	0.0010	0.0010	0.0014
	283.999	0.0009	0.0006	0.0015	0.0013	0.0019
	286.333	0.0009	0.0006	0.0015	0.0013	0.0019
	303.412	0.0010	0.0007	0.0017	0.0014	0.0021
	317.505	0.0010	0.0008	0.0018	0.0015	0.0023
	326.234	0.0011	0.0008	0.0019	0.0015	0.0024
Sr	407.771	0.0015	0.0013	0.0031	0.0023	0.0038
	460.733	0.0017	0.0017	0.0040	0.0028	0.0046
Ta	271.467	0.0007	0.0005	0.0013	0.0010	0.0016
	474.016	0.0012	0.0016	0.0040	0.0023	0.0043
	481.275	0.0013	0.0017	0.0041	0.0024	0.0044
Te	214.275	0.0007	0.0003	0.0008	0.0009	0.0012
	238.325	0.0007	0.0004	0.0010	0.0010	0.0014
	238.576	0.0007	0.0004	0.0010	0.0010	0.0014
Ti	363.546	0.0019	0.0011	0.0027	0.0025	0.0037
	364.268	0.0019	0.0011	0.0027	0.0025	0.0037
	365.350	0.0019	0.0011	0.0027	0.0025	0.0037
	399.864	0.0020	0.0014	0.0033	0.0028	0.0043
Tl	377.572	0.0009	0.0010	0.0025	0.0016	0.0028
	535.046	0.0013	0.0021	0.0050	0.0027	0.0053
V	318.341	0.0016	0.0009	0.0021	0.0021	0.0029
	318.398	0.0016	0.0009	0.0021	0.0021	0.0029
	318.540	0.0016	0.0009	0.0021	0.0021	0.0029
	411.178	0.0020	0.0014	0.0034	0.0029	0.0044
	437.924	0.0022	0.0016	0.0039	0.0031	0.0049
W	255.135	0.0007	0.0005	0.0011	0.0009	0.0015
	268.141	0.0007	0.0005	0.0013	0.0010	0.0016
	400.875	0.0010	0.0012	0.0028	0.0018	0.0032
	407.436	0.0011	0.0012	0.0029	0.0018	0.0033
Y	362.094	0.0014	0.0010	0.0025	0.0020	0.0031
	407.738	0.0015	0.0013	0.0031	0.0023	0.0037
	410.238	0.0016	0.0013	0.0032	0.0023	0.0038
	643.500	0.0024	0.0032	0.0078	0.0045	0.0085
Zn	213.856	0.0009	0.0004	0.0009	0.0011	0.0015
Zr	351.960	0.0013	0.0010	0.0023	0.0019	0.0029
	354.768	0.0013	0.0010	0.0024	0.0019	0.0029
	360.119	0.0013	0.0010	0.0024	0.0019	0.0030

（二）氧化亚氮-乙炔火焰谱线宽度数据

表 6-16 氧化亚氮-乙炔火焰谱线宽度数据[8]

元素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_L$(低)/nm	$\delta\lambda_L$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
Ag	328.068	0.0012	0.0008	0.0020	0.0017	0.0026
	338.289	0.0013	0.0009	0.0021	0.0018	0.0027
Al	309.271	0.0023	0.0009	0.0021	0.0028	0.0036
	309.284	0.0023	0.0009	0.0021	0.0028	0.0036
	394.401	0.0030	0.0015	0.0035	0.0038	0.0052
	396.152	0.0030	0.0015	0.0035	0.0038	0.0052
As	193.696	0.0009	0.0003	0.0007	0.0010	0.0013
	197.197	0.0009	0.0003	0.0007	0.0011	0.0013
	234.984	0.0011	0.0004	0.0010	0.0013	0.0017
	249.291	0.0011	0.0005	0.0012	0.0014	0.0019
	286.044	0.0013	0.0006	0.0015	0.0016	0.0023

续表

元 素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_L$(低)/nm	$\delta\lambda_L$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
As	289.871	0.0013	0.0007	0.0016	0.0017	0.0023
Au	242.795	0.0007	0.0004	0.0010	0.0009	0.0014
	267.595	0.0007	0.0005	0.0013	0.0010	0.0016
B	249.477	0.0030	0.0008	0.0018	0.0034	0.0040
	249.772	0.0030	0.0008	0.0018	0.0034	0.0040
Ba	455.403	0.0015	0.0015	0.0037	0.0025	0.0042
	553.548	0.0018	0.0023	0.0055	0.0033	0.0060
Be	234.861	0.0030	0.0007	0.0017	0.0034	0.0040
Bi	206.170	0.0006	0.0003	0.0007	0.0007	0.0010
	223.061	0.0006	0.0004	0.0009	0.0008	0.0012
	302.464	0.0008	0.0007	0.0016	0.0012	0.0019
	306.772	0.0009	0.0007	0.0016	0.0012	0.0020
	472.219	0.0013	0.0016	0.0039	0.0023	0.0043
Ca	393.366	0.0024	0.0013	0.0032	0.0032	0.0045
	422.673	0.0026	0.0015	0.0037	0.0035	0.0050
Cd	228.802	0.0008	0.0004	0.0009	0.0011	0.0014
	326.106	0.0012	0.0008	0.0019	0.0019	0.0025
Co	240.725	0.0012	0.0005	0.0011	0.0015	0.0019
	242.493	0.0012	0.0005	0.0011	0.0015	0.0019
	252.897	0.0013	0.0005	0.0012	0.0016	0.0020
	345.350	0.0018	0.0010	0.0023	0.0023	0.0033
	352.685	0.0018	0.0010	0.0024	0.0024	0.0034
	425.231	0.0022	0.0015	0.0035	0.0030	0.0045
Cr	357.869	0.0019	0.0011	0.0025	0.0025	0.0036
	359.349	0.0019	0.0011	0.0026	0.0025	0.0036
	425.435	0.0023	0.0015	0.0036	0.0032	0.0047
	520.604	0.0028	0.0022	0.0054	0.0041	0.0066
Cs	852.110	0.0029	0.0054	0.0130	0.0067	0.0136
	894.353	0.0030	0.0060	0.0143	0.0072	0.0149
Cu	324.754	0.0016	0.0008	0.0020	0.0021	0.0029
	327.396	0.0016	0.0009	0.0021	0.0021	0.0029
Fe	248.327	0.0013	0.0005	0.0012	0.0016	0.0020
	248.975	0.0013	0.0005	0.0012	0.0016	0.0020
	371.994	0.0019	0.0011	0.0027	0.0026	0.0037
	385.991	0.0020	0.0012	0.0029	0.0027	0.0039
Ga	287.424	0.0013	0.0007	0.0016	0.0017	0.0023
	294.364	0.0014	0.0007	0.0017	0.0018	0.0024
	294.418	0.0014	0.0007	0.0017	0.0018	0.0024
	417.206	0.0019	0.0014	0.0033	0.0028	0.0042
Ge	206.865	0.0009	0.0003	0.0008	0.0011	0.0014
	265.118	0.0012	0.0006	0.0013	0.0015	0.0020
	265.158	0.0012	0.0006	0.0013	0.0015	0.0020
Hf	286.637	0.0008	0.0006	0.0014	0.0012	0.0018
	307.288	0.0009	0.0007	0.0017	0.0013	0.0021
	368.224	0.0011	0.0010	0.0024	0.0017	0.0028
Hg	253.652	0.0007	0.0005	0.0011	0.0010	0.0015
In	303.936	0.0011	0.0007	0.0017	0.0015	0.0022
	325.609	0.0012	0.0008	0.0019	0.0016	0.0025
	410.176	0.0015	0.0013	0.0030	0.0023	0.0037
	451.131	0.0016	0.0015	0.0037	0.0026	0.0043
Ir	208.882	0.0006	0.0003	0.0008	0.0008	0.0011
	254.397	0.0007	0.0005	0.0011	0.0010	0.0015
	263.942	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0016
	263.971	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0016
	380.012	0.0011	0.0011	0.0025	0.0017	0.0029
K	766.491	0.0048	0.0051	0.0122	0.0080	0.0139
	769.898	0.0048	0.0051	0.0123	0.0080	0.0140
La	418.732	0.0014	0.0013	0.0031	0.0022	0.0037
	545.515	0.0018	0.0022	0.0053	0.0032	0.0059
	550.134	0.0018	0.0023	0.0054	0.0033	0.0060

续表

元 素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_c$(低)/nm	$\delta\lambda_c$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
La	576.934	0.0019	0.0025	0.0059	0.0035	0.0065
	657.851	0.0022	0.0032	0.0077	0.0043	0.0083
Li	323.263	0.0048	0.0015	0.0036	0.0056	0.0069
	670.780	0.0099	0.0064	0.0154	0.0136	0.0202
Mg	285.213	0.0023	0.0008	0.0019	0.0027	0.0034
Mn	279.482	0.0015	0.0006	0.0015	0.0018	0.0024
	279.827	0.0015	0.0006	0.0015	0.0018	0.0024
	280.106	0.0015	0.0006	0.0015	0.0018	0.0024
	403.076	0.0021	0.0013	0.0032	0.0029	0.0042
	403.307	0.0021	0.0013	0.0032	0.0029	0.0043
	403.449	0.0021	0.0013	0.0032	0.0029	0.0043
Mo	313.259	0.0012	0.0008	0.0018	0.0017	0.0024
	317.035	0.0013	0.0008	0.0018	0.0017	0.0025
	379.825	0.0015	0.0011	0.0027	0.0022	0.0033
	386.411	0.0015	0.0011	0.0027	0.0022	0.0034
	390.296	0.0016	0.0012	0.0028	0.0022	0.0035
Na	588.995	0.0048	0.0034	0.0081	0.0068	0.0103
	589.592	0.0048	0.0034	0.0081	0.0068	0.0103
Nb	334.910	0.0014	0.0009	0.0021	0.0019	0.0027
	405.894	0.0016	0.0013	0.0030	0.0024	0.0038
	407.973	0.0016	0.0013	0.0031	0.0024	0.0038
Ni	231.096	0.0012	0.0004	0.0010	0.0014	0.0018
	232.003	0.0012	0.0004	0.0010	0.0014	0.0018
	341.476	0.0017	0.0009	0.0023	0.0023	0.0032
	352.454	0.0018	0.0010	0.0024	0.0024	0.0034
Os	290.906	0.0008	0.0006	0.0015	0.0012	0.0018
	442.047	0.0012	0.0014	0.0034	0.0021	0.0038
Pb	216.999	0.0006	0.0003	0.0008	0.0008	0.0011
	283.306	0.0008	0.0006	0.0014	0.0011	0.0017
	368.348	0.0010	0.0010	0.0024	0.0016	0.0027
	405.783	0.0011	0.0012	0.0029	0.0018	0.0032
Pd	244.791	0.0009	0.0005	0.0011	0.0012	0.0016
	247.642	0.0009	0.0005	0.0011	0.0012	0.0016
	340.458	0.0013	0.0009	0.0021	0.0018	0.0027
	360.955	0.0014	0.0010	0.0024	0.0019	0.0030
	363.470	0.0014	0.0010	0.0024	0.0020	0.0030
Pt	265.945	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0016
	306.471	0.0009	0.0007	0.0016	0.0013	0.0020
Rb	780.023	0.0033	0.0047	0.0113	0.0064	0.0122
	794.760	0.0033	0.0049	0.0118	0.0066	0.0126
Re	228.751	0.0007	0.0004	0.0009	0.0009	0.0013
	346.046	0.0010	0.0009	0.0021	0.0015	0.0025
	346.473	0.0010	0.0009	0.0021	0.0015	0.0025
Rh	343.489	0.0013	0.0009	0.0022	0.0018	0.0028
	369.236	0.0014	0.0010	0.0025	0.0020	0.0031
	437.480	0.0017	0.0015	0.0035	0.0026	0.0042
Ru	349.894	0.0014	0.0009	0.0022	0.0019	0.0029
	372.803	0.0014	0.0011	0.0025	0.0021	0.0032
Sb	206.833	0.0007	0.0003	0.0008	0.0009	0.0012
	217.581	0.0008	0.0004	0.0009	0.0010	0.0013
	231.147	0.0008	0.0004	0.0010	0.0010	0.0014
	259.805	0.0009	0.0005	0.0012	0.0012	0.0017
Sc	390.749	0.0023	0.0013	0.0031	0.0030	0.0043
	391.181	0.0023	0.0013	0.0031	0.0030	0.0043
	402.040	0.0023	0.0014	0.0033	0.0031	0.0045
	630.567	0.0037	0.0034	0.0081	0.0057	0.0095
Se	196.026	0.0009	0.0003	0.0007	0.0010	0.0013
	203.985	0.0009	0.0003	0.0008	0.0011	0.0014
Si	251.611	0.0018	0.0006	0.0014	0.0022	0.0027
Sn	224.605	0.0008	0.0004	0.0009	0.0010	0.0014

续表

元素	λ/nm	δλ_D/nm	δλ_L(低)/nm	δλ_L(高)/nm	δλ_T(低)/nm	δλ_T(高)/nm
Sn	235.484	0.0008	0.0004	0.0010	0.0011	0.0015
	283.999	0.0010	0.0006	0.0015	0.0014	0.0020
	286.333	0.0010	0.0006	0.0015	0.0014	0.0020
	303.412	0.0011	0.0007	0.0017	0.0015	0.0022
	317.505	0.0011	0.0008	0.0018	0.0016	0.0024
	326.234	0.0012	0.0008	0.0019	0.0016	0.0025
Sr	407.771	0.0017	0.0013	0.0031	0.0025	0.0038
	460.733	0.0019	0.0016	0.0039	0.0029	0.0047
Ta	271.467	0.0008	0.0005	0.0013	0.0011	0.0017
	474.016	0.0014	0.0016	0.0039	0.0024	0.0044
	481.275	0.0014	0.0017	0.0041	0.0025	0.0045
Te	214.275	0.0007	0.0003	0.0008	0.0009	0.0013
	238.325	0.0008	0.0004	0.0010	0.0011	0.0015
	238.576	0.0008	0.0004	0.0010	0.0011	0.0015
Ti	363.546	0.0020	0.0011	0.0027	0.0027	0.0038
	364.268	0.0020	0.0011	0.0027	0.0027	0.0038
	365.350	0.0021	0.0011	0.0027	0.0027	0.0038
	399.864	0.0022	0.0013	0.0032	0.0030	0.0044
Tl	377.572	0.0010	0.0010	0.0025	0.0017	0.0029
	535.046	0.0015	0.0021	0.0050	0.0028	0.0054
V	318.341	0.0017	0.0008	0.0020	0.0022	0.0030
	318.398	0.0017	0.0008	0.0020	0.0022	0.0030
	318.540	0.0017	0.0008	0.0020	0.0022	0.0030
	411.178	0.0022	0.0014	0.0034	0.0030	0.0045
	437.924	0.0024	0.0016	0.0038	0.0033	0.0050
W	255.135	0.0007	0.0005	0.0011	0.0010	0.0015
	268.141	0.0008	0.0005	0.0013	0.0011	0.0016
	400.875	0.0012	0.0012	0.0028	0.0019	0.0032
	407.436	0.0012	0.0012	0.0029	0.0019	0.0033
Y	362.094	0.0015	0.0010	0.0024	0.0021	0.0031
	407.738	0.0017	0.0013	0.0031	0.0024	0.0038
	410.238	0.0017	0.0013	0.0031	0.0025	0.0039
	643.500	0.0027	0.0032	0.0077	0.0047	0.0085
Zn	213.856	0.0010	0.0004	0.0009	0.0012	0.0016
Zr	351.960	0.0014	0.0010	0.0023	0.0020	0.0030
	354.768	0.0014	0.0010	0.0023	0.0020	0.0030
	360.119	0.0015	0.0010	0.0024	0.0020	0.0031

（三）空气-氢气火焰谱线宽度数据

表 6-17　空气-氢气火焰谱线宽度数据[6]

元素	λ/nm	δλ_D/nm	δλ_L(低)/nm	δλ_L(高)/nm	δλ_T(低)/nm	δλ_T(高)/nm
Ag	328.068	0.0011	0.0011	0.0026	0.0017	0.0030
	338.289	0.0011	0.0011	0.0027	0.0018	0.0031
Al	309.271	0.0020	0.0011	0.0027	0.0027	0.0038
	309.284	0.0020	0.0011	0.0027	0.0027	0.0038
	394.401	0.0026	0.0018	0.0044	0.0037	0.0056
	396.152	0.0026	0.0018	0.0044	0.0037	0.0056
As	193.696	0.0008	0.0004	0.0009	0.0010	0.0014
	197.197	0.0008	0.0004	0.0009	0.0010	0.0014
	234.984	0.0009	0.0006	0.0013	0.0013	0.0018
	249.291	0.0010	0.0006	0.0015	0.0014	0.0020
	286.044	0.0011	0.0008	0.0020	0.0016	0.0025
	289.871	0.0012	0.0009	0.0021	0.0017	0.0026
Au	242.795	0.0006	0.0006	0.0014	0.0009	0.0016
	267.595	0.0007	0.0007	0.0016	0.0011	0.0019
B	249.677	0.0026	0.0009	0.0022	0.0031	0.0039
	249.772	0.0026	0.0009	0.0022	0.0031	0.0039
Ba	455.403	0.0013	0.0020	0.0049	0.0027	0.0052

续表

元素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_c$(低)/nm	$\delta\lambda_c$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
Ba	553.548	0.0016	0.0030	0.0072	0.0037	0.0075
Be	234.861	0.0027	0.0009	0.0020	0.0031	0.0039
Bi	206.170	0.0005	0.0004	0.0010	0.0007	0.0012
	223.061	0.0005	0.0005	0.0011	0.0008	0.0014
	302.464	0.0007	0.0009	0.0021	0.0013	0.0023
	306.772	0.0007	0.0009	0.0022	0.0013	0.0024
	472.219	0.0011	0.0021	0.0051	0.0026	0.0054
Ca	393.366	0.0021	0.0017	0.0041	0.0031	0.0050
	422.673	0.0023	0.0020	0.0047	0.0035	0.0056
Cd	228.802	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0016
	326.106	0.0011	0.0010	0.0025	0.0017	0.0029
Co	240.725	0.0011	0.0006	0.0014	0.0014	0.0020
	242.493	0.0011	0.0006	0.0015	0.0014	0.0020
	252.897	0.0011	0.0007	0.0016	0.0015	0.0022
	345.350	0.0015	0.0012	0.0030	0.0023	0.0036
	352.685	0.0016	0.0013	0.0031	0.0024	0.0038
	425.231	0.0019	0.0019	0.0045	0.0031	0.0052
Cr	357.869	0.0017	0.0014	0.0032	0.0025	0.0040
	359.349	0.0017	0.0014	0.0033	0.0025	0.0040
	425.435	0.0020	0.0019	0.0046	0.0032	0.0054
	520.604	0.0025	0.0029	0.0069	0.0043	0.0077
Cs	852.110	0.0025	0.0071	0.0170	0.0079	0.0174
	894.350	0.0027	0.0078	0.0188	0.0086	0.0191
Cu	324.754	0.0014	0.0011	0.0026	0.0020	0.0032
	327.396	0.0014	0.0011	0.0027	0.0021	0.0033
Fe	248.327	0.0011	0.0006	0.0016	0.0015	0.0022
	248.975	0.0011	0.0006	0.0016	0.0015	0.0022
	371.994	0.0017	0.0014	0.0035	0.0026	0.0042
	385.991	0.0018	0.0016	0.0037	0.0027	0.0045
Ga	287.424	0.0012	0.0008	0.0020	0.0017	0.0026
	294.364	0.0012	0.0009	0.0021	0.0017	0.0027
	294.418	0.0012	0.0009	0.0021	0.0017	0.0027
	417.206	0.0017	0.0018	0.0043	0.0028	0.0049
Ge	206.865	0.0008	0.0004	0.0010	0.0011	0.0015
	265.118	0.0011	0.0007	0.0017	0.0015	0.0022
	265.158	0.0011	0.0007	0.0017	0.0015	0.0022
Hf	286.637	0.0007	0.0008	0.0019	0.0012	0.0022
	307.288	0.0008	0.0009	0.0022	0.0014	0.0024
	368.224	0.0009	0.0013	0.0031	0.0018	0.0034
Hg	253.652	0.0006	0.0006	0.0015	0.0010	0.0017
In	303.936	0.0010	0.0009	0.0022	0.0015	0.0026
	325.609	0.0010	0.0010	0.0025	0.0017	0.0029
	410.176	0.0013	0.0017	0.0040	0.0024	0.0044
	451.131	0.0014	0.0020	0.0048	0.0028	0.0052
Ir	208.882	0.0005	0.0004	0.0010	0.0008	0.0012
	254.397	0.0006	0.0006	0.0015	0.0010	0.0017
	263.942	0.0007	0.0007	0.0016	0.0011	0.0018
	263.971	0.0007	0.0007	0.0016	0.0011	0.0018
	380.012	0.0009	0.0014	0.0033	0.0019	0.0036
K	766.491	0.0042	0.0064	0.0155	0.0085	0.0165
	769.898	0.0042	0.0065	0.0156	0.0086	0.0167
La	418.732	0.0012	0.0017	0.0041	0.0023	0.0044
	545.515	0.0016	0.0029	0.0070	0.0036	0.0073
	550.134	0.0016	0.0029	0.0071	0.0037	0.0074
	576.934	0.0017	0.0032	0.0078	0.0040	0.0081
	657.851	0.0019	0.0042	0.0101	0.0050	0.0105
Li	323.263	0.0042	0.0018	0.0042	0.0052	0.0068
	670.780	0.0087	0.0076	0.0182	0.0133	0.0217
Mg	285.213	0.0020	0.0010	0.0023	0.0025	0.0035
Mn	279.482	0.0013	0.0008	0.0020	0.0018	0.0026

续表

元素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_c$(低)/nm	$\delta\lambda_c$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
Mn	279.827	0.0013	0.0008	0.0020	0.0018	0.0026
	280.106	0.0013	0.0008	0.0020	0.0018	0.0026
	403.076	0.0019	0.0017	0.0041	0.0029	0.0048
	403.307	0.0019	0.0017	0.0041	0.0029	0.0048
	403.449	0.0019	0.0017	0.0041	0.0029	0.0048
Mo	313.259	0.0011	0.0010	0.0023	0.0017	0.0028
	317.035	0.0011	0.0010	0.0024	0.0017	0.0028
	379.825	0.0013	0.0014	0.0035	0.0022	0.0039
	386.411	0.0014	0.0015	0.0036	0.0023	0.0040
	390.296	0.0014	0.0015	0.0036	0.0023	0.0041
Na	588.995	0.0042	0.0042	0.0100	0.0068	0.0116
	589.592	0.0042	0.0042	0.0100	0.0068	0.0116
Nb	334.910	0.0012	0.0011	0.0027	0.0019	0.0031
	405.894	0.0014	0.0016	0.0040	0.0025	0.0044
	407.973	0.0015	0.0017	0.0040	0.0025	0.0045
Ni	231.096	0.0010	0.0006	0.0013	0.0014	0.0019
	232.003	0.0010	0.0006	0.0013	0.0014	0.0019
	341.476	0.0015	0.0012	0.0029	0.0023	0.0036
	352.454	0.0016	0.0013	0.0031	0.0024	0.0038
Os	290.906	0.0007	0.0008	0.0020	0.0012	0.0022
	442.047	0.0011	0.0019	0.0045	0.0024	0.0048
Pb	216.999	0.0005	0.0005	0.0011	0.0008	0.0013
	283.306	0.0007	0.0008	0.0018	0.0012	0.0021
	368.348	0.0009	0.0013	0.0031	0.0017	0.0033
	405.783	0.0010	0.0016	0.0038	0.0020	0.0040
Pd	244.791	0.0008	0.0006	0.0014	0.0012	0.0018
	247.642	0.0008	0.0006	0.0015	0.0012	0.0018
	340.458	0.0011	0.0011	0.0028	0.0018	0.0032
	360.955	0.0012	0.0013	0.0031	0.0020	0.0035
	363.470	0.0012	0.0013	0.0031	0.0020	0.0036
Pt	265.945	0.0007	0.0007	0.0016	0.0011	0.0019
	306.471	0.0008	0.0009	0.0022	0.0013	0.0024
Rb	780.023	0.0029	0.0061	0.0147	0.0073	0.0152
	794.760	0.0030	0.0064	0.0153	0.0075	0.0158
Re	228.751	0.0006	0.0005	0.0012	0.0009	0.0014
	346.046	0.0009	0.0012	0.0028	0.0016	0.0030
	346.473	0.0009	0.0012	0.0028	0.0016	0.0030
Rh	343.489	0.0012	0.0012	0.0028	0.0019	0.0032
	369.236	0.0013	0.0014	0.0032	0.0021	0.0037
	437.480	0.0015	0.0019	0.0046	0.0027	0.0050
Ru	349.894	0.0012	0.0012	0.0029	0.0019	0.0033
	372.803	0.0013	0.0014	0.0033	0.0021	0.0037
Sb	206.833	0.0006	0.0004	0.0010	0.0009	0.0013
	217.581	0.0007	0.0005	0.0011	0.0009	0.0014
	231.174	0.0007	0.0005	0.0013	0.0010	0.0014
	259.805	0.0008	0.0007	0.0016	0.0012	0.0019
Sc	390.749	0.0020	0.0016	0.0039	0.0030	0.0048
	391.181	0.0020	0.0016	0.0040	0.0030	0.0048
	402.040	0.0021	0.0017	0.0042	0.0031	0.0050
	630.567	0.0032	0.0043	0.0103	0.0060	0.0112
Se	196.026	0.0008	0.0004	0.0009	0.0010	0.0014
	203.985	0.0008	0.0004	0.0010	0.0010	0.0014
Si	251.611	0.0016	0.0007	0.0018	0.0020	0.0027
Sn	224.605	0.0007	0.0005	0.0012	0.0010	0.0015
	235.484	0.0007	0.0005	0.0013	0.0011	0.0016
	283.999	0.0009	0.0008	0.0019	0.0014	0.0023
	286.333	0.0009	0.0008	0.0019	0.0014	0.0023
	303.412	0.0010	0.0009	0.0022	0.0015	0.0025
	317.505	0.0010	0.0010	0.0024	0.0016	0.0027
	326.234	0.0010	0.0010	0.0025	0.0017	0.0029

续表

元素	λ/nm	$\delta\lambda_D$/nm	$\delta\lambda_c$(低)/nm	$\delta\lambda_c$(高)/nm	$\delta\lambda_T$(低)/nm	$\delta\lambda_T$(高)/nm
Sr	407.771	0.0015	0.0017	0.0040	0.0025	0.0045
	460.733	0.0017	0.0021	0.0051	0.0031	0.0056
Ta	271.467	0.0007	0.0007	0.0017	0.0011	0.0019
	474.016	0.0012	0.0022	0.0052	0.0027	0.0055
	481.275	0.0012	0.0022	0.0054	0.0028	0.0056
Te	214.275	0.0007	0.0004	0.0011	0.0009	0.0014
	238.325	0.0007	0.0006	0.0013	0.0011	0.0017
	238.576	0.0007	0.0006	0.0013	0.0011	0.0017
Ti	363.546	0.0018	0.0014	0.0034	0.0026	0.0042
	364.268	0.0018	0.0014	0.0034	0.0026	0.0042
	365.350	0.0018	0.0014	0.0034	0.0027	0.0042
	399.864	0.0020	0.0017	0.0041	0.0030	0.0049
Tl	377.572	0.0009	0.0014	0.0033	0.0018	0.0035
	535.046	0.0013	0.0027	0.0066	0.0033	0.0068
V	318.341	0.0015	0.0011	0.0026	0.0022	0.0033
	318.398	0.0015	0.0011	0.0026	0.0022	0.0033
	318.540	0.0015	0.0011	0.0026	0.0022	0.0033
	411.178	0.0020	0.0018	0.0043	0.0031	0.0051
	437.924	0.0021	0.0020	0.0049	0.0034	0.0057
W	255.135	0.0006	0.0006	0.0015	0.0010	0.0017
	268.141	0.0007	0.0007	0.0017	0.0011	0.0019
	400.875	0.0010	0.0015	0.0037	0.0020	0.0040
	407.436	0.0010	0.0016	0.0038	0.0021	0.0041
Y	362.094	0.0013	0.0013	0.0032	0.0021	0.0036
	407.738	0.0015	0.0017	0.0040	0.0025	0.0045
	410.238	0.0015	0.0017	0.0041	0.0026	0.0045
	643.500	0.0023	0.0042	0.0100	0.0052	0.0105
Zn	213.856	0.0009	0.0005	0.0011	0.0012	0.0016
Zr	351.960	0.0013	0.0012	0.0030	0.0020	0.0034
	354.768	0.0013	0.0013	0.0030	0.0021	0.0035
	360.119	0.0013	0.0013	0.0031	0.0021	0.0036

五、原子化效率（β 值）

原子化效率定义为中性原子浓度与原子、离子、化合物分子所有形态的金属总浓度之比，不同元素在火焰中的原子化程度有很大差别。原子化效率还和共存元素有关。表 6-18 中数据引自 Parsons M L，等编著的 "Handbook of Flame Spectroscopy" (1975)。

（一）火焰的原子化效率

表 6-18 火焰的原子化效率（β 值）

元素	火焰	T/K	β 值	元素	火焰	T/K	β 值
Ag	氧化亚氮-乙炔	2950	0.57	B	氧化亚氮-氢	2900	<0.001
	氧化亚氮-氢	2900	0.72		空气-乙炔	2450	<0.0006
	空气-乙炔	2450	0.70		空气-氢	2000	<0.001
	空气-氢	2000	0.85	Ba	氧化亚氮-乙炔	2950	0.17
	氩-氧-氢	2350	1.00		氧化亚氮-氢	2900	0.0046
Al	氧化亚氮-乙炔	2950	0.13		空气-乙炔	2450	0.0018
	氧化亚氮-氢	2900	<0.0001		空气-氢	2000	0.005
	空气-乙炔	2450	<0.00005	Be	氧化亚氮-乙炔	2950	0.095
	空气-氢	2000	<0.00008		氧化亚氮-氢	2900	0.0004
As	空气-乙炔	2450	0.0002		空气-乙炔	2450	0.00004
Au	氧化亚氮-乙炔	2950	0.27		空气-氢	2000	0.00002
	氧化亚氮-氢	2900	0.43	Bi	氧化亚氮-乙炔	2950	0.35
	空气-乙炔	2450	0.40		氧化亚氮-氢	2900	0.26
	空气-氢	2000	0.54		空气-乙炔	2450	0.17
B	氧化亚氮-乙炔	2950	0.0035		空气-氢	2000	0.63

续表

元素	火焰	T/K	β值
Ca	氧化亚氮-乙炔	2950	0.52[1]
	氧化亚氮-氢	2900	0.036[1]
	空气-乙炔	2450	0.07[1]
	空气-氢	2000	0.15[1]
Cd	氧化亚氮-乙炔	2950	0.56
	氧化亚氮-氢	2900	0.62
	空气-乙炔	2450	0.38
	空气-氢	2000	0.37
Co	氧化亚氮-乙炔	2950	0.25
	氧化亚氮-氢	2900	0.28
	空气-乙炔	2450	0.28
	空气-氢	2000	0.21
Cr	氧化亚氮-乙炔	2950	0.63
	氧化亚氮-氢	2900	0.042
	空气-乙炔	2450	0.071
	空气-氢	2000	0.31
Cs	空气-乙炔	2450	0.02
Cu	氧化亚氮-乙炔	2950	0.66
	氧化亚氮-氢	2900	0.92
	空气-乙炔	2450	0.88
	空气-氢	2000	0.96
	氧化亚氮-乙炔	2950	1.00[1]
Fe	氧化亚氮-乙炔	2950	0.83
	氧化亚氮-氢	2900	0.91
	空气-乙炔	2450	0.84
	空气-氢	2000	0.82
	氧化亚氮-乙炔	2950	1.00
Ga	氧化亚氮-乙炔	2950	0.73
	氧化亚氮-氢	2900	0.16
	空气-乙炔	2450	0.16
	空气-氢	2000	0.45
Ge	空气-乙炔	2450	0.001
Hg	空气-乙炔	2450	0.04
In	氧化亚氮-乙炔	2950	0.93
	氧化亚氮-氢	2900	0.61
	空气-乙炔	2450	0.67
	空气-氢	2000	1.07
Ir	空气-乙炔	2450	0.1
K	氧化亚氮-乙炔	2950	0.12[1]
	氧化亚氮-氢	2900	0.20[1]
	空气-乙炔	2450	0.32[1]
	空气-氢	2000	0.40[1]
Li	氧化亚氮-乙炔	2950	0.34[1]
	氧化亚氮-氢	2900	0.094[1]
	空气-乙炔	2450	0.12[1]
	空气-氢	2000	0.14[1]
	氧化亚氮-乙炔	2950	0.96[1]
Mg	氧化亚氮-乙炔	2950	0.88
	氧化亚氮-氢	2900	0.97
	空气-乙炔	2450	1.06
	空气-氢	2000	0.87
	氧化亚氮-乙炔	2950	0.99
Mn	氧化亚氮-乙炔	2950	0.77
Mn	氧化亚氮-氢	2900	0.54
	空气-乙炔	2450	0.62
	空气-氢	2000	0.75
Mo	空气-乙炔	2450	0.03
Na	氧化亚氮-乙炔	2950	0.97[1]
	氧化亚氮-氢	2900	0.90[1]
	空气-乙炔	2450	1.04[1]
	空气-氢	2000	1.06[1]
	氧化亚氮-乙炔	2950	0.99[1]
Ni	空气-乙炔	2450	1
Pb	氧化亚氮-乙炔	2950	0.84
	氧化亚氮-氢	2900	0.93
	空气-乙炔	2450	0.77
	空气-氢	2000	1.03
Pd	空气-乙炔	2450	1
Pt	空气-乙炔	2450	0.4
Rb	空气-乙炔	2500	0.16
Rh	空气-乙炔	2450	1
Ru	空气-乙炔	2450	0.3
Sb	空气-乙炔	2450	0.03
Se	空气-乙炔	2450	0.0001
Si	氧化亚氮-乙炔	2950	0.055
	氧化亚氮-氢	2900	<0.001
Si	空气-乙炔	2450	<0.001
	空气-氢	2000	<0.003
	氧化亚氮-乙炔	2950	0.065~0.12
Sn	氧化亚氮-乙炔	2950	0.82
	氧化亚氮-氢	2900	0.059
	空气-乙炔	2450	0.043
	空气-氢	2000	0.38
Sr	氧化亚氮-乙炔	2950	0.26
	氧化亚氮-氢	2900	0.039
	空气-乙炔	2450	0.063
	空气-氢	2000	0.17
Te	空气-乙炔	2450	0.01
Ti	氧化亚氮-乙炔	2950	0.11
	氧化亚氮-氢	2900	<0.003
	空气-乙炔	2450	<0.001
	空气-氢	2000	<0.002
	氧化亚氮-乙炔	2950	0.33~0.49
Tl	氧化亚氮-乙炔	2950	0.55
	氧化亚氮-氢	2900	0.61
	空气-乙炔	2450	0.52
	空气-氢	2000	0.68
V	氧化亚氮-乙炔	2950	0.32
	氧化亚氮-氢	2900	0.0081
	空气-乙炔	2450	0.015
	空气-氢	2000	0.018
W	空气-乙炔	2450	0.004
	氧化亚氮-乙炔	2950	0.71
Zn	氧化亚氮-乙炔	2950	0.54
	空气-乙炔	2450	0.62

[1] 电离完全抑制。

（二）无焰原子吸收法的原子化效率

在石墨炉原子吸收法中易原子化元素的β值为45%～60%，而绝大部分元素的原子化效率在10%左右。如果知道某元素的原子化效率β，另一种元素的β'值可由下式求得

$$\beta' = \frac{K_0 \cdot N_0 \cdot \beta}{K' \cdot N_0'} \tag{6-18}$$

式中，K' 和 N_0' 分别是另一种元素的吸收系数和总原子数，N_0 和 N_0' 可以理解为是能得到相同吸光度的两种溶液的浓度。

表 6-19 给出了部分元素无焰原子吸收法的原子化效率（β）。

表 6-19　无焰原子吸收法的原子化效率

元 素	原子化温度 T/K	β		元 素	原子化温度 T/K	β	
		计算值	实验值			计算值	实验值
K	1880	0.18	0.19	Al	2480	0.05	0.09
Rb	1910	0.10	0.20	Ba①	2480	0.07	0.06
Cs	1990	0.15	0.30	Zn②	1350	0.66	0.45
Na	1800	0.21	0.15	Mg③	1820	0.60	0.62
Ba	2480	0.002	0.06	In④	1600	0.03	0.02
Ca	2550	0.05	0.06	Cd②	1150	0.66	0.43
Sr	2710	0.01	0.01	Ag②	1410	0.50	0.35
Ga	2560	0.02	0.04	Cu①	2120	0.10	0.19

① 用塞曼效应进行背景校正。

②③④ 分别是用 Na 的 β 值，K 的 β 值和 Cs 的 β 值按式（6-18）计算的结果。

六、键的离解能、元素原子化键能和元素电离电位

表 6-20　双原子分子氧化物的离解能[10]

分子式	离解能/eV	分子式	离解能/eV	分子式	离解能/eV
AgO	2.0±0.5	HfO	7.6+1.5	SbO	4.0±1.0
AlO	4.6±0.1	HoO	7.6±1.5	ScO	6.97±0.15
AsO	4.9±0.1	IO	2.0+0.2	SeO	4.3±0.1
BO	8.0±0.3	InO	3.3±0.5	SiO	? 8.1+0.3
BaO	5.75±0.15	LaO	8.2+0.1	SnO	5.40±0.07
BeO	4.6±0.2	LiO	3.5±0.2	SrO	4.2±0.6
BiO	3.1±0.5	LuO	? 5.3	TaO	8.45±0.5
BrO	2.40±0.02	MgO	4.1±0.6	TeO	? 3.9±0.1
CO	11.09±0.02	MnO	4.16±0.13	ThO	8.5±? 0.2
CaO	4.3±0.7	MoO	5.0±0.65	TiO	7.2±0.1
CdO	<3.8	NO	6.50±0.01	TlO	或许不稳定
CeO	8.03±0.2	NbO	7.0±2.0	UO	7.8±0.3
ClO	2.746±0.001	NdO	7.1±0.2	VO	6.4+0.22
CrO	4.38±0.3	NiO	≤4.2	WO	6.8±0.4
CuO	? 4.1±0.3	OH	4.40+0.01	YO	7.31±0.1
FO	? 2.4±0.4	PO	6.4±0.3	YbO	5.3+1.5
FeO	4.3±0.5	PbO	3.87±0.05	ZnO	2.8±0.4
GaO	3.0±0.5	PrO	7.4±0.3	ZrO	7.8±0.4
GdO	7.0±0.5	RuO	1.8+0.4		
GeO	6.78±0.08	SO	5.357±0.003		

表 6-21　分子键的离解能[5]

元 素	键	离解能		元 素	键	离解能	
		$kJ \cdot mol^{-1}$	eV			$kJ \cdot mol^{-1}$	eV
Ag	Ag—Ag	159	1.6	Al	Al—Cl	490	5.1
	Ag—Br	289	3.0		ClAl—Cl	400	4.1
	Ag—Cl	314	3.3		Cl_2Al—Cl	372	3.9
	Ag—F	351	3.6		Al—F	659.0	6.8
	Ag—H	230	2.4		FAl—F	546.0	5.7
	Ag—I	287.4	3.0		F_2Al—F	544	5.6
	Ag—O	238	2.5		Al—H	280.3	2.9
Al	Al—Al	163	1.7		Al—I	364	3.8
	Al—Br	439	4.6		Al—O	481	5.0

续表

元 素	键	离解能	
		kJ · mol⁻¹	eV
Al	Al—P	213	2.2
	Al—S	402	4.2
	Al—N	293	3
As	As—As	380	3.9
	As—Cl	444	4.6
	As—N	577	6.0
	As—O	477	4.9
Au	Au—Au	215.5	2.2
	Au—Cl	289	3.0
	Au—H	285	2.9
B	B—B	293	3.0
	B—Br	433	4.5
	B—C	444	4.6
	B—Cl	531	5.5
	B—F	759	7.9
	FB—F	523	5.4
	F_2B—F	557	5.8
	B—H	326	3.4
	B—N	385	4.0
	B—O	782	8.1
	B—S	494	5.1
Ba	Ba—Cl	494	5.1
	ClBa—Cl	456	4.7
	Ba—F	569	5.9
	FBa—F	586	6.1
	Ba—H	196	2.0
	Ba—O	561	5.8
	Ba—OH	473	4.9
	(OH)Ba—OH	460	4.8
	Bs—S	396	4.1
Be	Be—Cl	358	4.0
	ClBe—Cl	536	5.6
	Be—F	573	5.9
	FBe—F	690	7.2
	Be—H	222	2.3
	Be—O	444	4.6
	Be—S	368	3.8
Bi	Bi—Bi	192	2.0
	Bi—Br	264	2.7
	Bi—Cl	301	3.1
	Bi—F	255	2.6
	Bi—H	242	2.5
	Bi—I	242	2.5
	Bi—S	289	3.0
	Bi—O	356	3.7
Br	Br—H	305	3.8
	Br—O	230	2.4
C	C—C	602	6.2
	C—H	335	3.5
	HC—H	415	4.3
	H_2C—H	469.9	4.9
	H_3C—H	425	4.4
	H—CN	531	5.5
	H—CO	119.7	1.2
	C—N	730.1	7.6
	C—O	1071.9	11.1
	OC—O	525.9	5.5
	C—S	757	7.8
Ca	Ca—Cl	427	4.4
Ca	ClCa—Cl	431	4.5
	Ca—F	552	5.7
	FCa—F	548	5.7
	Ca—O	460	4.8
	Ca—OH	418	4.3
	Ca—H	163	1.7
	Ca—S	372	3.9
	(OH)Ca—OH	490	5.1
	CaI	289	3
Cd	Cd—O	368	3.8
Ce	Ce—O	774	8.0
	Ce—S	565	5.8
	Ce—N	519	5.4
	Ce—C	452	4.7
Cl	Cl—Cl	239.7	2.5
	Cl—H	428	4.4
	Cl—O	268	2.8
Co	Co—Co	163	1.7
Cr	Cr—Cr	<167	<1.7
	Cr—O	423	4.4
	OCr—O	531	5.5
	O_2Cr—O	477	4.9
	Cr—Br	326	3.4
	Cr—Cl	360	3.8
	Cr—F	385	4
	Cr—H	276	2.8
	Cr—I	285	2.9
Cs	Cs—Br	416.3	4.3
	Cs—Cl	435	4.5
	Cs—F	502	5.2
	Cs—I	335	3.5
	Cs—OH	381	3.9
	Cs—Cs	42	0.4
	Cs—H	172	1.8
Cu	Cu—Cu	190.4	2.0
	Cu—F	293	3.0
	FCu—F	366	3.8
	Cu—H	276	2.9
	Cu—O	473	4.9
	Cu—Br	326	3.4
	Cu—Cl	347	3.6
	Cu—I	192	2
	Cu—S	297	3.1
Dy	Dy—O	628	6.5
	Dy—F	619	6.4
Er	Er—O	636	6.6
	Er—F	586	6.1
Eu	Eu—O	561	5.8
	Eu—F	548	5.7
	Eu—S	339	3.5
F	F—F	154.8	1.6
	F—H	565	5.9
	F—O	155	1.6
Fe	Fe—O	385	4.0
	Fe—Br	243	2.5
	Fe—Cl	347	3.6
Ga	Ga—Br	435	4.5
	Ga—Cl	477	4.9
	Ga—F	602	6.2

续表

元素	键	离解能 kJ·mol⁻¹	eV
Ga	Ga—Ga	113	1.2
	Ga—H	272	2.8
	Ga—I	351	3.6
	Ga—O	247	2.6
	Ga—OH	431	4.5
Gd	Gd—O	715	7.4
	Gd—F	649	6.7
	Gd—S	515	5.3
Ge	Ge—Br	251	2.6
	Ge—C	456	4.7
	Ge—Cl	339	3.5
	Ge—F	484	5.0
	Ge—Ge	272	2.8
	Ge—H	318	3.3
	Ge—O	669	6.9
	Ge—S	556	5.8
H	H—H	432.00	4.5
Hf	Hf—O	774	8.0
Hg	Hg—Br	68.6	0.7
	Hg—Cl	96	1.0
	Hg—S	268	2.8
	Hg—H	36	0.4
	Hg—F	130	1.3
	Hg—I	34	0.4
Ho	Ho—O	628	6.5
	Ho—F	561	5.8
	Ho—S	397	4.1
I	I—H	294.6	3.1
	I—I	148.95	1.5
	I—O	180	1.9
In	In—Br	406	4.2
	In—Cl	435	4.5
	In—F	523	5.4
	In—H	238	2.5
	In—I	339	3.5
	In—O	105	1.1
	In—S	146	1.5
	In—OH	360	3.7
	In—In	100	1.0
K	K—Br	378.7	3.9
	K—Cl	423	4.4
	K—F	490	5.1
	K—I	326	3.4
	K—OH	339	3.5
	K—H	180	1.9
La	La—La	241.0	2.5
	La—O	782	8.1
	La—S	573	5.9
Li	Li—Br	418	4.3
	Li—Cl	464	4.8
	Li—F	573	5.9
	Li—I	347	3.6
	Li—O	335	3.4
	Li—OH	423	4.4
	Li—Li	109	1.1
	Li—H	234	2.4
Lu	Lu—O	695	7.2
	Lu—S	502	5.2
Mg	Mg—F	460	4.8
Mg	Mg—O	377	3.9
	Mg—OH	234	2.4
	FMg—F	577	6.0
	Mg—Cl	310	3.2
	ClMg—Cl	322	3.3
	Mg—Br	310	3.2
	Mg—H	192	2.0
	Mg—S	<230	<2.4
Mn	Mn—Br	293	3.0
	Mn—Cl	335	3.5
	Mn—I	279.1	2.9
	Mn—Mn	<88	0.9
	Mn—O	402	4.2
	Mn—S	298.7	3.1
	Mn—F	502	5.2
	Mn—H	230	2.4
Mo	Mo—O	485	5.0
	OMo—O	669	6.9
	O_2Mo—O	561	5.8
N	N—H	365	3.7
	HN—H	372	3.9
	H_2N—H	431	4.5
	N—N	941.69	9.8
	NO—N	474.9	4.9
	N—O	628	6.5
Na	Na—Br	366.1	3.8
	Na—Cl	410	4.2
	Na—I	297	3.1
	Na—O	272	2.8
	Na—OH	322	3.3
	Na—Na	71	0.75
	Na—F	477	4.9
	Na—H	197	2.0
Nb	Nb—O	753	7.8
	ONb—O	678	7.0
Nd	Nd—O	690	7.2
	Nd—F	545	5.6
	FNd—F	611	6.3
	Nd—S	469	4.9
Ni	Ni—Br	356	3.7
	Ni—Cl	347	3.6
	Ni—I	289	3.0
	Ni—Ni	228.0	2.4
	Ni—O	406	4.2
	Ni—F	368	3.8
	Ni—H	251	2.6
O	O—H	423.8	4.4
	HO—H	493.7	5.1
	O—O	493.59	5.1
Os	O_3Os—O	452	4.7
P	P—O	592.0	6.1
	P—P	481	5.0
	P—F	435	4.5
	P—M	339	3.5
	P—N	586	7.1
	P—S	502	5.2
Pb	Pb—O	377	3.9
	Pb—S	318	3.3
	Pb—Pb	75	0.8

续表

元素	键	离解能	
		kJ·mol⁻¹	eV
Pb	Pb—Br	243	2.5
	Pb—Cl	297	3.1
	Pb—F	289	3
	Pb—H	172	1.8
	Pb—I	192	2
Pd	Pd—O	280	2.9
	Pd—Pd	<138	<1.4
Po	Po—Po	184	1.9
Pr	Pr—O	715	7.4
Pt	Pt—C	628	6.5
	Pt—H	347	3.6
Ra	Ra—Cl	339	3.5
Rb	Rb—Br	385	4.0
	Rb—Cl	444	4.6
	Rb—F	490	5.1
	Rb—I	331	3.4
	Rb—O	347	3.6
	Rb—Rb	46	0.47
	Rb—H	163	1.7
Rh	Rh—O	423	4.4
	Rh—C	582	6
Ru	Ru—O	435	4.5
S	S—H	349.4	3.6
	HS—H	377	3.9
	S—O	517.1	5.4
	OS—O	547.3	5.7
	O_2S—O	342.7	3.6
	S—S	427.7	4.4
Sb	Sb—Sb	295	3.1
	Sb—O	427	4.4
	Sb—Br	310	3.2
	Sb—Cl	356	3.7
	Sb—F	435	4.5
	Sb—N	297	3.1
Sc	Sc—Sc	108.4	1.1
	Sc—F	506	5.2
	Sc—O	669	6.9
	Sc—S	477	4.9
	Sc—Cl	385	4.0
Se	Se—O	339	3.5
	Se—Se	305	3.2
Si	Si—Si	314	3.4
	Si—H	310	3.2
	Si—O	803	8.3
	Si—Br	339	3.5
	Si—C	431	4.5
	Si—Cl	435	4.5
	Si—F	481	5.0
	Si—N	435	4.5
	Si—S	615	6.4
	OSi—O	469	4.9
Sn	Sn—O	544	5.6
	Sn—S	464	4.8
	Sn—Sn	192	2.0
	Sn—Br	192	2.0
	Sn—Cl	310	3.2
	Sn—F	376	3.9
	Sn—H	359	2.7
Sr	Sr—Cl	335	3.5
Sr	ClSr—Cl	418	4.3
	Sr—F	540	5.6
	FSr—F	565	5.9
	Sr—O	460	4.8
	Sr—OH	410	4.2
	(OH)Sr—OH	490	5.1
	Sr—S	314	3.2
	Sr—H	163	1.7
Ta	Ta—O	810	8.4
	OTa—O	669	6.9
Tb	Tb—O	715	7.4
Te	Te—Te	218	2.3
	Te—O	254	2.7
	Te—S	335	3.5
Th	Th—O	820	8.5
	OTh—O	<770	<8.0
Ti	Ti—Ti	<243	<2.5
	Ti—O	653	6.8
	OTi—O	519	5.4
	Ti—S	444	4.6
	Ti—C	≤531	≤5.8
Tl	Tl—Br	326	3.4
	Tl—Cl	364	3.8
	Tl—F	439	4.6
	Tl—I	280	2.9
	Tl—Tl	<88	<0.9
Tm	Tm—O	582	6.0
U	U—O	749	7.8
	OU—O	674	7.0
	O_2U—O	640	6.6
	U—S	561	5.8
V	V—O	617.6	6.4
	OV—O	617.6	6.4
W	W—O	661	6.9
	OW—O	628	6.5
	O_2W—O	594	6.2
Y	Y—Y	156.1	1.6
	Y—O	699	7.2
	Y—F	360	3.7
	Y—Cl	339	3.5
	OY—O	243	2.5
	Y—S	523	5.4
Yb	Yb—O	377	3.9
	Yb—M	155	1.6
Zn	Zn—S	201	2.1
	Zn—O	385	4
	Zn—Zn	25	0.25
	Zn—Cl	205	2.1
	Zn—H	84	0.8
	Zn—I	134	1.4
Zr	Zr—O	753	7.8
	OZr—O	628	6.5
	Zr—Cl	481	5.1
	ClZr—Cl	540	5.6
	Zr—N	519	5.4

表 6-22 元素原子化键能 E_a

原子化体系	原子化出现温度/K	E_a 实验值/(kJ·mol⁻¹)	化学反应[①]	键[①]	对应温度/K	E_a 手册值/(kJ·mol⁻¹)	反应种类
Pb/HCl	1040	193	$Pb(l) \longrightarrow Pb(g)$	Pb(l)	1040~1160	178	还原
Pb/HNO_3		117	$\frac{1}{2}Pb_2(g) \longrightarrow Pb(g)$	Pb-Pb	1160~1350	100	
Cu/HCl	1270	322	$Cu(s) \longrightarrow Cu(g)$	Cu(s)	1273~1400	338	还原
Cu/HNO_3		184	$\frac{1}{2}Cu_2(g) \longrightarrow Cu(g)$	Cu-Cu	1400~1600	194	
Co/HCl	1430	406	$Co(s) \longrightarrow Co(g)$	Co(s)	1430~1600	429	还原
Co/HNO_3		184	$\frac{1}{2}Co_2(s) \longrightarrow Co(g)$	Co-Co	1600~1750	167	
Sn/HCl	1560	310	$Sn(l) \longrightarrow Sn(g)$	Sn(l)	1560~1760	302	还原
Sn/HNO_3		197	$\frac{1}{2}Sn_2(g) \longrightarrow Sn(g)$	Sn-Sn	1760~2040	196	
Ni/HCl	1590	415	$Ni(s) \longrightarrow Ni(g)$	Ni(s)	1590~1760	430	还原
Ni/HNO_3		209	$\frac{1}{2}Ni_2(g) \longrightarrow Ni(g)$	Ni-Ni	1760~2060	232	
Mo/NH_4OH	2100	691	$Mo(s) \longrightarrow Mo(g)$	Mo(s)	2100~2400	657	还原
V/NaOH	2200	640	$VO(g) \longrightarrow V(g)+O(g)$	V-O	2200~2400	645	还原
		486	$V(l) \longrightarrow V(g)$	V(l)	2400~2530	460	还原
Fe/HNO_3	1500	406	$Fe(s) \longrightarrow Fe(g)$	Fe(s)	1500~1750	416	还原
Cr/HNO_3 Cr/HCl	1660	415	$Cr(s) \longrightarrow Cr(g)$	Cr(s)	1600~2080	398	还原
Mg/HNO_3 Mg/HCl	1510	377	$MgO(g) \longrightarrow Mg(g)+O(g)$	Mg—O	1510~1800	394	分解
Cd/HNO_3	720	272	$CdO(g) \longrightarrow Cd(g)+O(g)$	Cd—O	720~800	281	分解
Zn/HNO_3	1140	272	$ZnO(g) \longrightarrow Zn(g)+O(g)$	Zn—O	1140~1360	276	分解
Mn/HNO_3 Mn/HCl	1480	385	$MnO(g) \longrightarrow Mn(g)+O(g)$	Mn—O	1480~1700	402	分解
Ca/HNO_3 Ca/HCl	1850	377	$CaO(g) \longrightarrow Ca(g)+O(g)$	Ca—O	1850~2280	352	分解
Al/HNO_3	2080	978	$Al_2O_3 \longrightarrow Al(g)+O_2(g)-AlO(g)$	Al—O	2080~2200	925	分解
Al/HCl		477	$AlO(g) \longrightarrow Al(g)+O(g)$		2200~2420	486	分解
Cd/HCl	670	209	$CdCl(g) \longrightarrow Cd(g)+Cl(g)$	Cd—Cl	670~770	209	分解
Zn/HCl	940	201	$ZnCl(g) \longrightarrow Zn(g)+Cl(g)$	Zn—Cl	940~1100	205	分解
Fe/HCl	1400	360	$FeCl(g) \longrightarrow Fe(g)+Cl(g)$	Fe—Cl	1400~1650	352	分解

① 括号内:g 代表气体,l 代表液体,s 代表固体。

表 6-23 元素的电离电位[17]

元素	电离电位		元素	电离电位		元素	电离电位	
	eV	kJ·mol⁻¹		eV	kJ·mol⁻¹		eV	kJ·mol⁻¹
Ac	6.9	666	Cl	12.967	1251.1	Hg	10.437	1007.0
Ag	7.576	731.0	Cm			Ho	6.02	581
Al	5.986	577.6	Co	7.86	758	I	10.451	1008.4
Am	6.0	579	Cr	6.766	652.8	In	5.786	558.3
Ar	15.759	1520.5	Cs	3.894	375.7	Ir	9.1	878
As	9.81	947	Cu	7.726	745.5	K	4.341	418.8
At	9.5	921.5	Dy	5.93	572	Kr	13.999	1350.7
Au	9.225	890.1	Er	6.10	589	La	5.577	538.1
B	8.298	799.8	Eu	5.67	547	Li	5.392	520.3
Ba	5.212	502.9	F	17.422	1681.0	Lu	5.426	523.5
Be	9.322	899.5	Fe	7.870	759.4	Mg	7.646	737.7
Bi	7.289	703.3	Fm			Mn	7.435	717.4
Bk			Fr	4.0	388	Mo	7.099	685.0
Br	11.814	1139.9	Ga	5.999	578.8	N	14.534	1402.3
C	11.260	1086.4	Gd	6.14	592	Na	5.139	495.8
Ca	6.113	589.8	Ge	7.899	762.2	Nb	6.88	664
Cd	8.993	867.7	H	13.598	1312.0	Nd	5.49	530
Ce	5.47	528	He	24.587	2372.3	Ne	21.564	2080.6
Cf			Hf	7.0	675	Ni	7.635	736.7

续表

元素	电离电位		元素	电离电位		元素	电离电位	
	eV	$kJ \cdot mol^{-1}$		eV	$kJ \cdot mol^{-1}$		eV	$kJ \cdot mol^{-1}$
No			Rh	7.45	720	Te	9.01	873.97
Np			Rn	10.748	1037.0	Th	7.5	724
O	13.618	131.40	Ru	7.37	711	Ti	6.82	685
Os	8.7	839	S	10.360	999.61	Tl	6.108	589.3
P	10.486	1011.8	Sb	8.641	833.7	Tm	6.18	596
Pb	7.416	715.5	Sc	6.54	631	U	6.3	608
Pd	8.34	805	Se	9.752	940.9	V	6.74	650
Po	8.42	812	Si	8.149	790.45	W	7.98	770
Pr	5.42	528	Sm	5.63	543	Xe	12.130	1170.4
Pt	9.0	868	Sn	7.344	708.6	Y	6.38	616
Pu	5.8	560	Sr	5.695	549.5	Yb	6.254	603.4
Ra	5.279	509.4	Ta	7.89	761	Zn	9.394	906.4
Rb	4.177	403.0	Tb	5.85	564	Zr	6.84	660
Re	7.88	760	Tc	7.28	702			

七、各种火焰性能

表 6-24 各种火焰性能表(预混型火焰)

燃气	助焰气	化学计量反应	释放能 E/kJ	室温下可燃极限[2] φ/%		最低着火温度/K	最大燃烧速度/$(cm \cdot s^{-1})$	最高火焰温度/K	
				下限	上限			计算值	测量值
H_2	空气	$H_2+\frac{1}{2}O_2+2N_2 \longrightarrow H_2O+2N_2$	2.41997×10^2	4	75	803	310	2373	2318
	O_2	$H_2+\frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$	2.41997×10^2	4	94	723	1400	3083	2933
	N_2O	$H_2+N_2O \longrightarrow H_2O+N_2$	3.34477×10^2				390	2920	2880
	NO	$H_2+NO \longrightarrow H_2O+\frac{1}{2}N_2$	3.3243×10^2			1593	55	3113	3093
	NO_2	$H_2+\frac{1}{2}NO_2 \longrightarrow H_2O+\frac{1}{4}N_2$	2.5874×10^2				200	2933	1823
	(O_2+Ar)	$H_2+\frac{1}{2}O_2+2Ar \longrightarrow H_2O+2Ar$	2.41997×10^2				335		2250
C_2H_2	空气	$C_2H_2+\frac{5}{2}O_2+10N_2 \longrightarrow 2CO_2+H_2O+10N_2$	1.2565×10^3	2.5	80	623	158	2523	2500
	O_2	$C_2H_2+\frac{5}{2}O_2 \longrightarrow 2CO_2+H_2O$	1.25665×10^3	2.0	95	608	1140	3341	3160
	N_2O	$C_2H_2+5N_2O \longrightarrow 2CO_2+H_2O+5N_2$	1.6810×10^3	2.2	67		160	3152	2990
	NO	$C_2H_2+5NO \longrightarrow 2CO_2+H_2O+\frac{5}{2}N_2$	1.7086×10^3				87	3363	3368
	NO_2	$C_2H_2+\frac{5}{2}NO_2 \longrightarrow 2CO_2+H_2O+\frac{5}{4}N_2$	1.3406×10^3				135		
	(O_2+Ar)[1]	$C_2H_2+\frac{5}{2}O_2+10Ar \longrightarrow 2CO_2+H_2O+10Ar$	1.2565×10^3				228		
甲烷	空气	$CH_4+2O_2+8N_2 \longrightarrow CO_2+2H_2O+8N_2$	8.0303×10^2	5.3	15	918	45	2222	2148
	O_2	$CH_4+2O_2 \longrightarrow CO_2+2H_2O$	8.0303×10^2	5.1	61	918	450	3010	2950
丙烷	空气	$C_3H_8+5O_2+20N_2 \longrightarrow 2CO_2+4H_2O+20N_2$	2.2215×10^3	2.1	9.4	510	82	2198	2198
	O_2	$C_3H_8+5O_2 \longrightarrow 2CO_2+4H_2O$	2.2215×10^3			490		3123	3123
丁烷	空气	$C_4H_{10}+\frac{13}{2}O_2+26N_2 \longrightarrow 4CO_2+5H_2O+26N_2$	2.8801×10^3	1.9	8.4	490	82.6	2203	2163
	O_2	$C_4H_{10}+\frac{13}{2}O_2 \longrightarrow 4CO_2+5H_2O$	2.8801×10^3			460		3183	3173
乙烷	空气	$C_2H_6+\frac{7}{2}O_2+14N_2 \longrightarrow 2CO_2+3H_2O+14N$	1.5859×10^3	3.0	12.5	530	85.0		
	O_2	$C_2H_6+\frac{7}{2}O_2 \longrightarrow 2CO_2+3H_2O$	1.5859×10^3	4.1	50.5	500			
煤气	空气	煤气$+0.980O_2+3.9N_2 \longrightarrow CO_2+H_2O+3.9N_2$	4.5552×10^3	9.8	24.3	560	55	2113	1980
	O_2	煤气$+0.980O_2 \longrightarrow CO_2+H_2O$	4.5552×10^3	10.0	73.6	450		3073	3013
氰	空气	$(CN)_2+O_2+4N_2 \longrightarrow 2CO+5N_2$	5.3047×10^2	7.6	38.0		90		
	O_2	$(CN)_2+O_2 \longrightarrow 2CO+N_2$	5.3047×10^2				270	4813	

① 与空气等体积混合。

② 为室温下可燃极限，指混合气体在室温下燃烧时燃气所占的体积分数。

第三节　原子吸收分光光度计

一、原子吸收分光光度计结构概述[8]

原子吸收分光光度计由光源、原子化器、分光系统和检测系统4部分组成。按光束形式可分为单光束和双光束两类，按包含"独立"的分光和检测系统的数目又可分为单道、双道和多道。目前普遍使用的是单道单光束或单道双光束原子吸收分光光度计。单光束原子吸收分光光度计的基本结构如图6-4所示。来自光源的特征辐射通过原子化器，部分辐射被基态原子吸收，透过部分经过分光系统，使所需的辐射通向检测器，将光信号转变成电信号并经放大和读出。

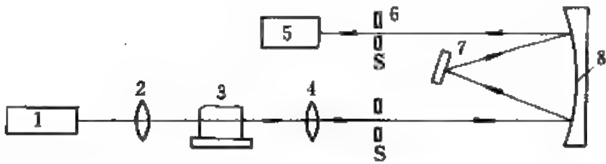


图6-4　单光束原子吸收仪器[9]

1—空心阴极灯；2,4—透镜；3—原子化器；5—检测器；6—狭缝；7—光栅；8—反射镜

双光束原子吸收分光光度计的基本结构如图6-5所示。仪器将来自光源的特征辐射经切光器分解成样品光束和参比光束，样品光束经原子化器被基态原子部分吸收，参比光束不通过原子化器，其光强不被减弱，两光束由半透明反射镜合为一束，经分光系统后进入检测器。检测系统在显示器或记录仪上给出两光束信号之比。

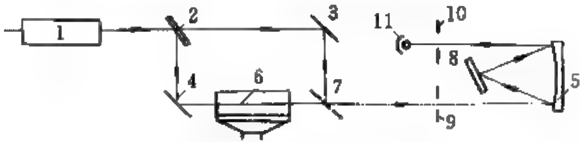


图6-5　双光束原子吸收仪器[9]

1—空心阴极灯；2—旋转反射镜；3,4,5—反射镜；6—原子化器；7—半反射镜；8—光栅；9—入射狭缝；10—出射狭缝；11—检测器

双道双光束型仪器的基本结构如图6-6所示。

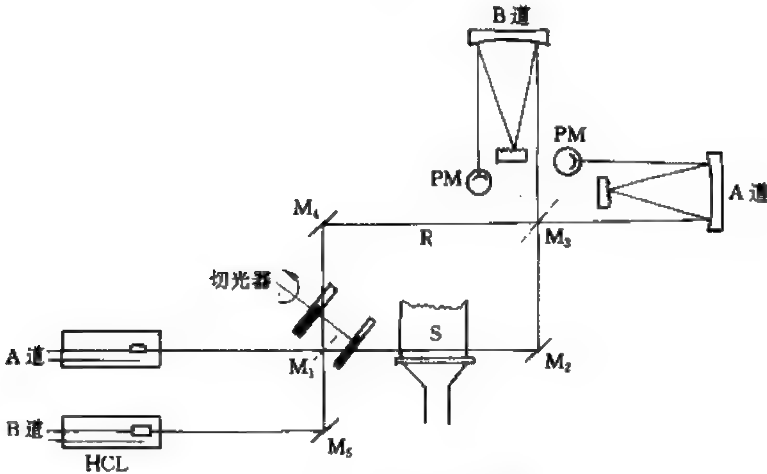


图6-6　双道双光束型仪器

M_1，M_3—半透半反镜；M_2、M_4、M_5—反射镜；R—参比光束；S—样品光束；PM—检测器

其检测系统可以进行4种运算方式：A和B方式为单道双光束，A—B方式为背景扣除，A/B方式为内标运算。

1990 年日立首产的 Z9000 型，它发展了早期美国 IL 公司的双道型（IL951 型）为四道系统，将同时发自 4 只空心阴极灯的辐射，经一 4 面镜会聚于石墨管中，其不同调制信号分别由 4 只光电倍增管采集，同时测定 4 个元素。1994 年 PE 公司推出了 SIMAA6000 多元素同时分析原子吸收光谱仪，该仪器以新型四面体中阶梯光栅取代了普通光栅单色器获取二维光谱，以广谱响应的固体检测器替代了光电倍增管，取得了同时检测多元素的理想效果。

1977 年日立公司生产 170-70 型通用塞曼效应原子吸收分光光度计投放市场，近 20 年间发展迅速，90 年代前，无论是恒定磁场-偏振调制型或是交变磁场调制型都是横向磁场（与光轴垂直）。

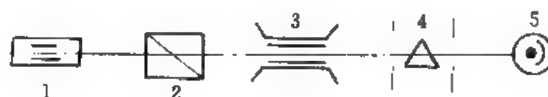


图 6-7　恒定磁场塞曼原子吸收分光光度计
1—光源；2—偏振器；3—磁场和石墨炉；4—单色器；5—光电倍增管

恒定磁场塞曼原子吸收分光光度计装置示意图见图 6-7。在与光束垂直的方向上给原子化器加永久磁场。在磁场中吸收线分裂为 π 和 $\sigma\pm$ 成分，π 成分的偏振方向与磁场平行，波长不变；$\sigma\pm$ 成分的偏振方向与磁场垂直，并偏离原来的中心波长。由空心阴极灯发出的光经过旋转式偏振器，分为 $P_{/\!/}$ 和 $P_{\perp}$ 两条传播方向一致，波长相同但偏振方向相互垂直的偏振光，$P_{/\!/}$ 的偏振方向与磁场平行，$P_{\perp}$ 的偏振方向与磁场垂直。当 $P_{/\!/}$ 与 $P_{\perp}$ 交替的通过原子蒸气时，$P_{/\!/}$ 被原子蒸气吸收，而 $P_{\perp}$ 不被吸收。但背景吸收与偏振方向无关，对 $P_{/\!/}$ 与 $P_{\perp}$ 是一样的，因此用 $P_{/\!/}$ 作样品光束，$P_{\perp}$ 作参比光束即可进行背景校正。

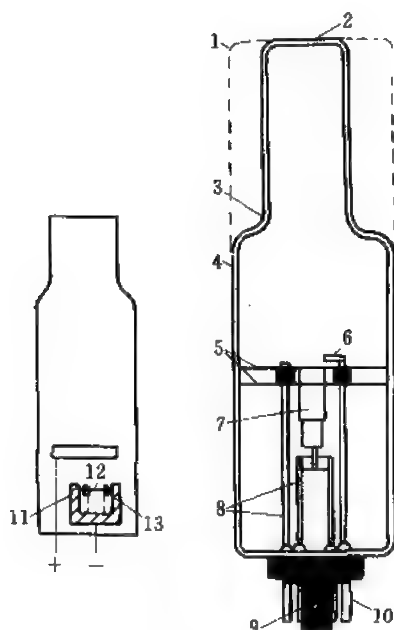


图 6-8　封闭型空心阴极灯结构示意图
1—紫外玻璃窗口；2—石英窗口；3—密封；4—玻璃套；5—云母屏蔽；6—阳极；7—阴极；8—支架；9—管座；10—连接管脚；11，13—阴极位降区；12—负辉光区

磁场调制型塞曼原子吸收分光光度与恒定磁场的不同，一是给原子化器加的是交变磁场，二是不需要偏振元件。其工作原理是磁场加于原子化器上，由导通和关断磁场进行调制，在不同磁场强度时刻采样。当磁感应强度 $B=0$ 时，测量原子吸收和背景吸收之和，当磁感应强度 $B=B_{max}$ 时，仅测量背景吸收。

以上两种塞曼原子吸收分光光度计，因置偏振镜，使光强减弱 50%～60%，灵敏度和检出限受影响。在 AAS 可能的 8 种塞曼组合中，以纵向（交变）磁场为最佳，在横向加热炉问世后，该技术已得到实现。从目前情况来看，商品原子吸收分光光度计的最佳组合将是横向加热石墨炉原子化器、高通量的阶梯光栅多色仪、高量子效率固态检测器和纵向塞曼效应背景校正等新技术的结合。

二、原子吸收分光光度计的基本部件[10]

（一）光源

光源的基本功能是发射被测元素的特征辐射。光源应具备的基本特点是强度大、谱线窄、背景小，稳定性高、光谱纯度高、起辉电压适当、寿命长和价廉等性能。最常用的光源有空

心阴极灯和无极放电灯，其他光源还有蒸气放电灯，高频放电灯以及激光光源等。

1. 空心阴极灯

空心阴极灯的结构示意图如图 6-8 所示。空心阴极灯是阴极为空心阴极的一种特殊形式的低压辉光放电光源，阴极表面的相应元素的原子进入放电空间是阴极溅射和热蒸发作用的结果。而发射被测元素的特征辐射是放电过程中积聚在空心阴极内的相应元素与电子，惰性气体原子以及离子相互间发生非弹性碰撞而被激发产生的。空心阴极灯发射出的特征谱线半宽主要取决于多普勒变宽和自吸变宽，在正常的工作电流下均可忽略，故发射的是锐线光谱。

目前国内生产的空心阴极灯完全可以满足国内外各种型号的原子吸收分光光度计的要求，元素品种达 60 余种。表 6-25 列出了由北京有色金属研究总院空心阴极灯生产线生产的 AS-1 型空心阴极灯性能参数表，以供参考。

表 6-25　AS-1 型空心阴极灯性能参数表①

元素	λ/nm	填充气体	窗口材料	最大电流/mA	工作电流/mA	起辉电压/V(直流)	工作电压/V(直流)	相对灵敏度	推荐光谱带宽/nm
Ag	328.07	氖气	石英	20	4	260	190	1.0	0.5
	338.28							2.0	0.5
Al	309.27	氖气	右英	20	5	230	180	1.0	0.5
	396.15							1.1	0.5
As	193.70	氖气	石英	12	8	260	230	1.0	1.0
	197.28							1.8	1.0
Au	242.80	氖气	石英	20	4	270	220	1.0	1.0
	267.20							1.8	1.0
B	249.77	氖气	石英	25	10	310	230	1.0	0.2
Ba	553.55	氖气	玻璃	16	8	200	125	1.0	0.5
	350.11							41	0.5
Be	234.86	氖气	石英	20	8	260	190	1.0	1.0
Bi	223.06	氖气	石英	20	8	270	195	1.0	0.2
	306.77							3.8	0.5
Ca	422.67	氖气	玻璃	20	5	190	130	1.0	0.5
Cd	228.80	氖气	石英	16	4	280	260	1.0	0.5
	326.11							409	0.5
Ce	520.01 520.04	氖气	玻璃	25	10	<360	—	1.0	0.2
	569.7							1.3	0.2
Co	240.73	氖气	石英	20	8	285	170	1.0	0.2
Cr	357.87	氖气	石英	20	5	235	185	1.0	0.2
	428.97							5.9	0.5
Cs	852.11	氖气	玻璃	18	8	135	100	1.0	1.0
	455.54							5.3	0.5
Cu	324.75	氖气	石英	20	4	280	200	1.0	0.5
	217.89							6.3	0.2
	222.57							20	0.2
Dy	421.17	氖气	玻璃	25	8	230	130	1.0	0.2
Eu	459.40	氖气	玻璃	25	10	205	135	1.0	0.2
	333.43							338	0.5
Er	400.8	氖气	玻璃	25	8	<360		1	0.5
Fe	248.33	氖气	石英	25	8	240	170	1.0	0.2
	371.99							6.9	0.2
Ga	294.36	氖气	石英	15	5	240	190	1.0	0.5
	287.42							1.0	0.5
Gd	368.41	氖气	玻璃	25	10	230	135	1.0	0.2
	405.82							1.5	0.2
Ge	265.16	氖气	石英	25	8	270	200	1.0	1.0
	269.13							3.0	0.5
	303.91							21	0.5
Hf	307.92	氖气	石英	20	8	250	140	1.0	0.2
	368.22							4.7	0.5

续表

元 素	λ/nm	填充气体	窗口材料	最大电流/mA	工作电流/mA	起辉电压/V(直流)	工作电压/V(直流)	相对灵敏度	推荐光谱带宽/nm
Hg	253.65	氖气	石英	8	2	260	230	1.0	0.5
Ho	410.38	氖气	石英	25	10	250	140	1.0	0.2
	425.44							55	0.5
In	303.94	氖气	石英	15	5	255	190	1.0	0.5
	271.03							16	0.2
Ir	208.88	氖气	石英	25	10	260	180	1.0	0.2
	263.97							2.7	0.2
	266.48							3.0	0.2
	254.40							2.8	0.2
K	766.49	氖气	玻璃	15	4	160	100	1.0	1.0
	769.60							2.0	1.0
	404.41							5.6	0.5
La	550.13	氖气	玻璃	20	10	215	135	1.0	0.2
	403.72							2.9	0.5
	357.44							7.7	0.5
Li	670.78	氖气	玻璃	15	4	155	140	1.0	1.0
	323.26							329	0.2
Lu	335.96							1	1.0
	356.78	氩气	玻璃	25	10	<360		1.7	0.5
Mg	285.21	氖气	石英	15	4	210	130	1.0	0.5
	202.50							30	1.5
Mn	279.48	氖气	石英	25	5	270	180	1.6	0.2
	403.08							1.1	0.2
Mo	313.26	氖气	石英	25	8	265	140	1.0	0.5
	320.88							9.0	0.2
Na	589.00	氖气	玻璃	20	5	160	105	1.0	0.6
	589.59							1.9	1.0
Nb	334.91	氖气	石英	20	10	280	160	1.0	0.2
	358.03							1.0	0.5
	407.67							1.0	0.5
Ni	232.00	氖气	石英	25	8	270	180	1.0	0.2
	352.45							3.4	0.5
	351.50							13	0.5
Os	290.91	氖气	石英	25	10	<360		1	0.2
	426.09							16	1.0
Pb	217.00	氖气	石英	15	6	220	205	1.1	1.0
	283.30							2.0	0.5
	261.41							36	0.5
Pd	244.79	氖气	石英	25	8	260	170	1.0	0.2
	247.64							1.3	0.2
	340.46							4.8	0.2
Pr	495.14	氖气	石英	25	10	230	140	1.0	0.5
	513.34							2.1	0.5
Pt	265.95	氖气	石英	20	10	250	180	1.0	0.2
	299.80							4.4	0.5
Rb	780.02	氖气	玻璃	20	8	175	100	1.0	0.2
	794.76							2.8	0.2
Re	346.05	氖气	石英	25	10	250	145	1.0	0.2
	346.47							1.7	0.2
	345.19							2.6	0.2
Rh	343.49	氖气	石英	20	10	270	180	1.0	0.5
	328.06							51	0.2
Ru	349.89	氖气	玻璃	25	10	255	150	1.0	0.2
	392.59							11	0.2
Sb	217.58	氖气	石英	20	10	280	180	1.0	0.2
	231.18							2.7	0.5
Sc	391.18	氖气	玻璃	20	10	290	160	1.0	0.2
	327.36							2.5	0.2
Se	196.03	氖气	石英	15	10	330	280	1.0	1.0

续表

元素	λ/nm	填充气体	窗口材料	最大电流/mA	工作电流/mA	起辉电压/V(直流)	工作电压/V(直流)	相对灵敏度	推荐光谱带宽/nm
Se	203.99							14	0.5
Si	251.61	氖气	石英	25	10	280	195	1.0	0.2
	250.69							3.1	0.2
Sm	429.67	氖气	玻璃	25	10	190	130	1.0	0.2
	476.03							1.5	0.5
Sn	224.61	氖气	石英	25	8	250	185	1.0	0.5
	286.33							1.3	0.5
Sr	460.73	氖气	玻璃	20	10	200	130	1.0	0.5
Ta	271.46	氖气	石英	25	10	220	150	1.0	0.2
	275.83							5.3	0.5
Tb	432.65	氖气	玻璃	25	10	250	150	1.0	0.2
	431.86							1.3	0.3
	433.85							2.3	0.2
Te	214.28	氖气	石英	20	8	260	180	1.0	0.5
	225.90							1.6	0.5
Ti	364.27	氖气	石英	20	10	200	145	1.0	0.5
	365.35							1.1	0.2
	398.98							2.4	0.5
Tl	276.79	氖气	石英	20	8	280	240	1.0	0.5
	258.01							75	1.0
Tm	371.79	氖气	玻璃	25	15	<360		1.0	0.5
	420.37							3.1	1.0
V	318.54	氖气	石英	20	8	220	170	1.0	0.2
	318.40							1.3	0.2
	306.64							3.0	0.5
	439.00							7.2	0.5
W	255.14	氖气	石英	30	10	240	135	1.0	0.2
	400.88							2.9	0.5
	407.44							6.4	0.5
Y	410.24	氖气	玻璃	25	10	<360		1.0	0.5
	414.29							1.5	0.5
Yb	398.80	氖气	石英	20	10	185	120	1.0	0.5
	246.45							37	0.2
Zn	213.86	氖气	石英	15	5	330	230	1.0	1.0
Zr	360.12	氖气	玻璃	20	10	220	130	1.0	0.2
	468.78							8	0.2

① 本表引自北京有色金属研究院空心阴极灯生产线，原子吸收光谱分析用光源。

高强度空心阴极灯是在普通阴极灯内增加一对“辅助电极”，放电方向横过阴极口外，使空心阴极灯放电溅出的原子与辅助电极产生的强大电子流发生更多碰撞，从而发出较强的辐射。此种灯比普通空心阴极灯的光强度增强几倍或几百倍，而不增加线宽，适用于分析线在远紫外区的砷、硒或谱线复杂的稀土元素以及谱线有干扰的镍的分析。实际工作中希望能用一个灯进行多种元素的分析，即可免去换灯的麻烦、减少预热消耗的时间，又可降低原子吸收分析的成本。现已应用的多元素灯，一灯可最多测6～7种元素。使用多元素灯易产生干扰，使用前应先检查测定的波长附近有无单色器不能分开的非待测元素的谱线。

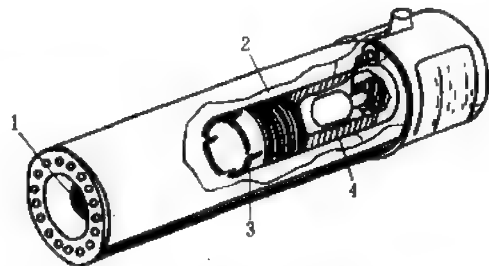


图 6-9 无极放电灯结构

1—石英窗；2—螺旋振荡线圈；3—陶瓷管；4—石英管灯

2. 无极放电灯（EDL）

该灯亦称微波激发无极放电灯。它是在石

英管内放入少量金属或其卤化物，抽真空，并充入几百帕压力的氩气后封闭，将它放在高频电场中激发发光。无极放电灯的结构如图 6-9 所示。

此种光源的发射强度比空心阴极灯约强 100～1000 倍，且主要是共振线，故目前对此光源的研究和应用逐渐增多。目前有 18 种元素的商品无极放电灯（见表 6-26）。

表 6-26 商品无极放电灯种类

元素	无极放电灯		备注	元素	无极放电灯		备注
Al	Aluminum	EDL	需用氧化亚氮-乙炔火焰	P	Phosphorus	EDL	需用氧化亚氮-乙炔火焰
Sb	Antimony	EDL		K	Potassium	EDL	
As	Arsenic	EDL		Rb	Rubidium	EDL	不能用于 P-E 公司 103 或 107 型仪器
Bi	Bismuth	EDL		Se	Selenium	EDL	
Cd	Cadmium	EDL	不用于 P-E 公司 103 或 107 型仪器	Te	Tellurium	EDL	
Ge	Germanium	EDL	需用氧化亚氮-乙炔火焰	Tl	Thallium	EDL	
Pb	Lead	EDL		Ti	Titanium	EDL	需用氧化亚氮-乙炔火焰
Hg	Mercury	EDL		Zn	Zinc	EDL	

其他尚有蒸气放电灯、氙弧灯、时间分解火花及火焰可作原子吸收光谱分析的光源，但使用不普遍。

（二）原子化器

原子化器的作用是使各种形式的试样解离出在原子吸收中起作用的基态原子，并使其进入光源的辐射光程。样品的原子化是原子吸收光谱分析的一个关键。元素测定的灵敏度、准确性及干扰情况，在很大程度上取决于原子化的情况。因此要求原子化器有尽可能高的原子化效率，稳定性、重现性好，背景和噪声小，装置简单。常用的原子化器有火焰原子化器和无火焰原子化器两类。

1. 火焰原子化器

火焰原子化包括两个步骤，首先将试样溶液变成细小的雾滴——雾化阶段；其次是使小雾滴接受火焰供给的能量形成基态原子——原子化阶段。所以火焰原子化器系统由雾化器、预混合室、燃烧器组成（图 6-10）。

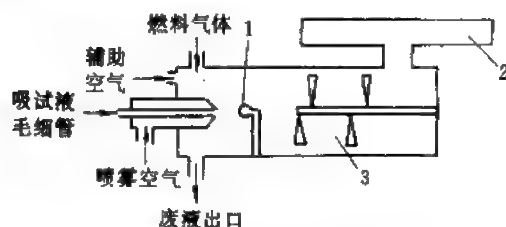


图 6-10 火焰原子化器示意图

1—冲击球；2—燃烧器；3—扰流器

雾化器的作用是使试样溶液雾化。对雾化器的要求是雾化效率高、雾滴细、喷雾稳定。预混合室的作用是使试液进一步雾化并与燃气均匀混合，理想的预混合室主要是使气溶胶匀化，粒分布范围窄、预混均匀，以获得稳定的层流火焰。燃烧器的作用是产生火焰并使试样原子化。一个良好的燃烧器应当具有原子化效率高、噪声小、火焰稳定的特点。根据构造不同燃烧器可分为两种，即预混合型（层流）燃烧器和全消耗型（紊流）燃烧器。前者通常是使试样、燃料和助燃氧化剂在进入火焰之前预先混合均匀，后者则是试样的雾滴、燃料和助燃剂同时进入火焰而无预混合的过程。在原子吸收光谱分析中都采用预混合型。

按火焰提供方法不同，火焰原子化器又可分为化学火焰原子化器和等离子火焰原子化器。化学火焰原子化器常用的火焰包括：

①空气-煤气（丙烷）火焰，火焰温度大约为 1900K。适用于分析那些生成的化合物易挥发和解离的元素，如碱金属、Cd、Cu、Pb、Ag、Zn、Au 及 Hg 等。

②空气-乙炔火焰　这种火焰温度比空气-煤气火焰高，是广泛应用的一种化学火焰，适于

30 多种元素的测定。

③N_2O-乙炔火焰　此种火焰燃烧速度低、火焰温度高。大约可测定 70 种元素，是目前广泛应用的高温化学火焰，在使用过程中，禁止调节雾化器。

④空气-氢火焰　此种火焰是无色低温火焰。适于测定易电离的金属元素，尤其是测定 As、Se 和 Sn 等元素。

化学火焰原子化器比较简单、普通，但火焰的原子化效率低，普通雾化器的效率仅为 10%～30%。

2. 无火焰原子化器

无火焰原子化器也称为电热原子化器，应用这种装置提高了试样的原子化效率和试样的利用率，测定灵敏度可增加10～20倍。无火焰原子化器有多种类型：电热高温石墨管、碳棒原子化器、石墨杯原子化器、钽舟、镍杯、高频感应炉、等离子喷焰等等。下面介绍普遍使用的几种：

(1) 石墨管原子化器　这是使用最普遍的一种原化器，其实质就是一个石墨电阻加热器。高温石墨管原子化器示意图见图 6-11。常用的石墨管外径 6mm，内径为 4mm，长为 30mm 左右，管的中央上方开有进样口，以便用微量进样器将试液注入石墨管内。用大电流（400A～600A，10V～15V）加热石墨管，最高温度可达 3000℃。使用的石墨管有普通石墨管、金属碳化物涂层石墨管、热解石墨涂层管、内层衬以某些金属片的石墨管等(请参阅第七章，第四节石墨管改进技术)。样品在石墨管内原子化。在测定时先用小电流在 100℃左右进行干燥。再在适当温度下灰化，最后加热到原子化温度。为防止试样及石墨管氧化，需通以氩气保护。

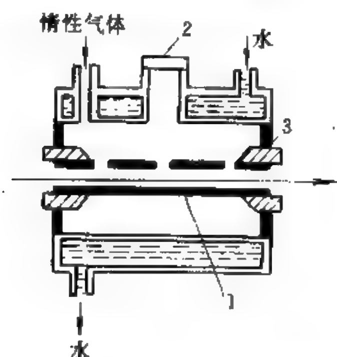


图 6-11　高温石墨管原子化器示意图
1—石墨管；2—可卸式窗；
3—绝缘材料

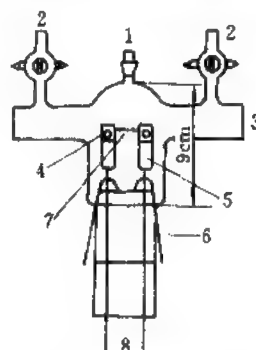


图 6-12　石墨棒原子化器
1—试样入口；2—氩气入口、出口；3—石英窗；
4—固定夹；5—支架；6—滑动配合部分；
7—石墨棒；8—电缆

(2) 碳棒原子化器　韦斯特设计的棒状石墨原子化器见图 6-12。通常碳棒直径 5mm，长约 50mm，中间小孔可以滴加样品。石墨棒作为发热体，其功率较小（仅 0.5kW)，只要用空气冷却即可，它能容纳的试样量少（最多 10μL），因此灵敏度不高。

(3) 石墨杯原子化器　典型的石墨杯原子化器示意图见图 6-13。它适于固体、胶体和液体样品，特别适用于有残渣产生的样品。石墨杯的位置如果横向放置，也可做管状原子化器使用。在使用中要经常

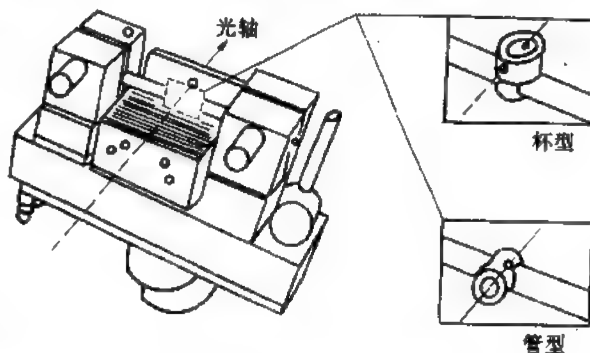


图 6-13　石墨杯原子化器

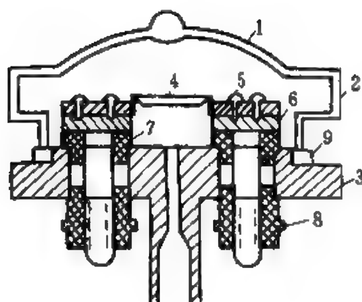


图 6-14　钼舟原子化器结构示意图
1—玻璃罩；2—熔凝石英片；3—铜制托盘；
4—钼片；5—压片；6—铜螺柱；
7—聚四氟乙烯垫圈；8—垫片；
9—真空胶垫

检查石墨杯和支持电极接触部位的接触情况，以免使原子化温度发生波动。

(4) 钼舟型原子化器　图 6-14 为钼舟型原子化器示意图，在一圆形钢制底盘上装有两个黄铜接线柱，钼舟固定在接线柱上端，钼舟用厚 0.1mm、宽 5mm 的钼片压制，中间成凹形，样品滴在凹处，蒸干时不易流失。为控制气氛，在底盘罩上一个带石英窗的硬质玻璃罩，通过排气—充气口用泵将吸收室抽真空并充入一定压强的氩气，工作时电流为 100 安培左右。

(三) 分光系统——单色器

分光系统的作用是将欲测的吸收线与其他谱线分开。原子吸收所用的吸收线是锐线光源发出的共振线，谱线比较简单，因此对仪器的色散能力、分辨能力要求较低。谱线结构简单的元素，如 K、Na，可用干涉滤光片作为单色器，一般元素可用棱镜或光栅分光。目前商品仪器多采用光栅，其倒线色散率 (0.25～6.6) $nm \cdot mm^{-1}$。图 6-15 为光栅单色器的结构示意图。

在实际工作中，通常根据谱线结构和欲测共振线邻近是否有干扰线来决定狭缝宽度。由于不同类型的仪器的单色器的倒线色散率不同，故不用具体的狭缝宽度，而用“单色器通带”表示缝宽更具普遍意义。单色器通带＝缝宽/mm×倒线色散率/ ($nm \cdot mm^{-1}$)，在具体分析时，缝宽通过实验来选定。

(四) 测光系统

测光系统由光电元件和放大器组成。光电元件一般采用光电倍增管，原子吸收工作光域通常为 (190～800) nm，不少商品仪器在短波方面可测至 197.3nm (砷)，长波方面可测至 852.1nm (铯)。近年来“日盲光电倍增管”的采用逐渐增多，其光谱响应范围为 (160～320) nm。它对大于 320nm 波长的辐射无反应，而用在小于 300nm 的元素时可减少干扰和噪声。放大器分直流放大与交流放大两种。由于直流放大不能排除火焰中待测元素原子发射光谱的影响，故已趋淘汰，目前广泛采用的是交流选频放大和相敏放大器。

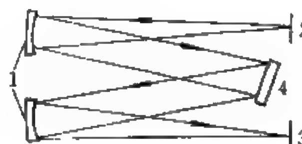


图 6-15　光栅单色器结构示意图
1—凹面镜；2—人光狭缝；
3—出光狭缝；4—光栅

(五) 显示系统

电信号经测光系统放大、检波后，可以分别采用表头、检流计、数字显示器或记录器、打印机等进行读数。现代生产的仪器具有对数转换、自动调零、曲线校直、浓度直读、标尺扩展、自动增益等性能，并附有记录器、打印机、自动进样器、阴极射线管荧光屏及计算机等装置。这些装置大大提高了原子吸收仪器的自动化或半自动化程度。

三、仪器安装调试和验收

为了保证原子吸收光谱仪器的质量，1983 年我国颁布了单光束、双光束原子吸收分光光度计专业标准 ZBY195—83，1990 年又颁布了原子吸收分光光度计检定规程 JJG694—90。对于新制造、使用中和修理后的原子吸收分光光度计，需按照中华人民共和国国家计量检定规

程JJG694—90进行验收，具体规程包括如下内容：

（一）技术要求

（1）外观与初步检查

①仪器应有下列标志：仪器名称、型号、制造厂名、出厂编号与出厂日期等。

②仪器及附件的紧固件紧固良好；连接件连接良好；运动部位运动灵活、平稳；气路系统可靠密封，不得泄漏。

③仪器的各旋钮及功能键应能正常工作；由计算机控制或带微机的仪器，当由键盘输入指令时，各相应的功能正常。

（2）波长示值误差与重复性　波长示值误差不大于±0.5nm，波长重复性优于0.3nm。

（3）分辨率　仪器光谱带宽为0.2nm时，应可分辨锰的279.5nm和279.8nm双线。

（4）基线稳定性　30min内静态基线和点火基线的稳定性应不大于下表所列指标：

项目		新制造(A)	使用中或修理后(A)
静态基线	最大零漂移	±0.005	±0.006
	最大瞬时噪声	0.005	0.006
点火基线	最大零漂移	±0.006	±0.008
	最大瞬时噪声	0.006	0.008

（5）边缘能量　在仪器边缘波长处，应能对砷193.7nm，铯852.1nm谱线进行测定。其瞬时噪声应小于0.03A。

（6）火焰法测定铜的检出限（$C_{L(K=3)}$）和精密度（RSD）　新制造仪器分别不大于0.008 $\mu g \cdot ml^{-1}$和1%；使用中和修理后的仪器应分别不大于0.02$\mu g \cdot ml^{-1}$和1.5%。

（7）石墨炉法测定镉的检出限（$Q_{L(K=3)}$），特征量（CM）和精密度（*RSD*）　新制造仪器应分别不大于2pg、1pg和5%；使用中和修理后的仪器分别不大于4pg、2pg和7%。

（8）样品溶液吸喷量和表观雾化率　吸喷量应不小于3ml·min^{-1}；雾化率应不小于8%。

（9）背景校正能力　在背景衰减信号约为1A时，校正后的信号应不大于该值的1/30。

（10）绝缘电阻　仪器的绝缘电阻应不小于20MΩ。

（11）新制造仪器必须全面进行第1～10条的检定；使用中和修理后的仪器原则上进行第2～7条及9条的检定，必要时增加第8条的检定。

（二）检定条件

1. 环境条件

仪器应安放在无剧烈震动，无腐蚀性气体，通风良好的实验室内，附近应无强电磁场干扰，仪器上方应有排风系统，室温应为（5～35）℃，相对湿度不大于80%。仪器供电电压（220±22）V，频率为（50±1）Hz。

2. 检定设备

（1）空心阴极灯　Hg，Cu，Mn，Cd，As，Cs等，其起辉性能及稳定性等经检查合格。

（2）标准溶液　该溶液必须是国家计量行政部门批准颁布并具有相应标准物质《制造计量器具许可证》的单位提供的标准物质，其浓度和不确定度列于表6-27。

（3）微量移液管　10，20，30μl。

（4）秒表　最小分度1s。

（5）量筒　容量10ml，最小分度0.2ml。

（6）500V兆欧表。

（7）光衰减相当于1A的衰减器。

表 6-27　标准溶液的浓度与不确定度

溶液名称	浓　度	不确定度	溶液名称	浓　度	不确定度
空白	$0.5mol \cdot l^{-1}HNO_3$		镉	$0.50ng \cdot ml^{-1}$ $1.00ng \cdot ml^{-1}$ $3.00ng \cdot ml^{-1}$ 5.00①$ng \cdot ml^{-1}$	3%
铜	$0.50\mu g \cdot ml^{-1}$ $1.00\mu g \cdot ml^{-1}$ $3.00\mu g \cdot ml^{-1}$ 5.00①$\mu g \cdot ml^{-1}$	1%	氯化钠	$5.0mg \cdot ml^{-1}$	3%

① 供必要时选用。

(8) 去离子水　电导率不大于 $0.1\mu S \cdot cm^{-1}$。

(三) 检定项目和方法

1. 外观与初步检查

仪器外观与初步检查应符合技术要求中外观与初步检查规定。

2. 波长示值误差与重复性检定

(1) 波长的测量　按空心阴极灯上规定的工作电流，将汞灯点亮，稳定后在光谱带宽 0.2nm 条件下，从下列汞、氖谱线：253.7、365.0、435.8、546.1、640.2、724.5 和 871.6nm 中，按均匀分布原则选取 3 至 5 条逐一作 3 次单向（从短波到长波）测量，以给出最大能量的波长示值为测量值。对于自动设定波长的仪器，可从打印出的谱线轮廓图或显示屏幕上读出波长的测量值。

(2) 波长示值误差与重复性的计算　波长示值误差（$\Delta\lambda$）按下式计算：

$$\Delta\lambda=\frac{1}{3}\sum_{1}^{3}\lambda_i-\lambda_r$$

式中　λ_r——汞、氖谱线的波长标准值；

　　λ_i——汞、氖谱线的波长测量值。

波长重复性（δ_λ）按下式计算：

$$\delta_\lambda=\lambda_{max}-\lambda_{min}$$

式中　λ_{max}——某谱线 3 次波长测量值中的最大值；

　　λ_{min}——某谱线 3 次波长测量值中的最小值。

3. 分辨率的检定

点亮锰灯，稳定后，光谱带宽 0.2nm，调节光电倍增管高压，使 279.5nm 谱线能量为 100，然后扫描测量锰双线。此时应能明显分辨出 279.5nm 和 279.8nm 两条谱线，且两线间峰谷能量应不超过 40%。

4. 基线稳定性检定

(1) 静态基线稳定性　光谱带宽 0.2nm，量程扩展 10 倍，点亮铜灯，在原子化器未工作的状态下，按以下步骤测量：

①单光束仪器与铜灯同时预热 30min，用“瞬时”测量方法，或时间常数不大于 0.5s，测定 324.7nm 谱线的稳定性，即为 30min 内最大漂移量和瞬时噪声（峰-峰值）。

②双光束仪器预热 30min，铜灯预热 3min，再按单光束仪器测定方法进行测定。

(2) 点火基线稳定性　按测铜的最佳条件，点燃乙炔-空气火焰，吸喷去离子水。10min 后在吸喷去离子水状况下，重复 4(1)的测量，30min 内最大漂移量和瞬时噪声应符合(一)(4)要求。

5. 边缘能量检定

点亮砷和铯灯，待其稳定后，在光谱带宽为 0.2nm，响应时间不大于 1.5s 的条件下（使

用中和修理后的仪器可用生产厂推荐的条件）对As 193.7nm和Cs 852.1nm谱线进行以下（1）和（2）条（或3条）的测量。

（1）两谱线的峰值能量应该可以调到100%，且背景值/峰值应不大于2%。

（2）测量谱线的瞬时噪声：5min内最大瞬时噪声（峰-峰值）应不大于0.03A。

（3）两谱线调到能量为100%时，光电倍增管的高压不超过650V，使用中和修理后的仪器可放宽到最大高压值的85%。

6. 火焰原子化法测铜的检出限（$C_{L(K=3)}$）检定

（1）将仪器各参数调至最佳工作状态，用空白溶液调零，分别对3种铜标准液进行3次重复测定，取3次测定的平均值后，按线性回归法求出工作曲线的斜率，即为仪器测铜的灵敏度（S）：

$$S=\mathrm{d}A/\mathrm{d}C \quad [\mathrm{A}\cdot(\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{ml}^{-1})^{-1}]$$

（2）在与6(1)完全相同条件下，将标尺扩展10倍，对空白溶液（或浓度3倍于检出限的溶液进行11次吸光度测量，并求出其标准偏差（s_A）。

（3）按下列式子计算仪器测铜的检出限：

$$C_{L(K=3)}=3s_A/S \quad (\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{ml}^{-1})$$

7. 火焰原子化法测铜的精密度检定

在进行第6条测定时，选择系列标准液的某一种，使吸光度为0.1～0.3范围，进行7次测定，求出其相对标准偏差（RSD），即为仪器测铜的精密度。

8. 石墨炉原子化法测镉的检出限（$Q_{L(K=3)}$）检定

（1）将仪器各参数调至最佳工作状态，分别对空白和3种镉标准液进行3次重复测定。取3次测定的平均值，按线性回归法求出工作曲线的斜率，即为仪器测镉的灵敏度（S）。

$$S=\mathrm{d}A/\mathrm{d}Q=\mathrm{d}A/\mathrm{d}\ (C\cdot V)$$

式中　C——溶液浓度（$\mathrm{ng}\cdot\mathrm{ml}^{-1}$）；

　　V——取样体积（μl）。

（2）在与8(1)款完全相同的条件下，对空白溶液进行11次吸光度测定，并求出其标准偏差（s_A）。

（3）按下式计算仪器测镉的检出限：

$$Q_{L(K=3)}=3s_A/S \quad (\mathrm{g})$$

（4）仪器测定镉的特征量（CM）按下式计算：

$$C\cdot M\cdot=\frac{0.0044}{S} \quad (\mathrm{pg})$$

9. 石墨炉原子化法测镉的精密度检定

在进行第8条测定时，对3.00ng·ml^{-1}的镉标准溶液进行7次重复测定，并求出其相对标准偏差（RSD），即为仪器测镉的精密度。

10. 样品溶液的吸喷量（F）和表观雾化率（ε）的检定

（1）在与第6条相同条件下，在10ml量筒内注入去离子水至最上端刻线处，将毛细管插入量筒底部，同时启动秒表，测量1min时间内量筒水所减少的体积，即为吸喷量（F）。

（2）将进样毛细管拿离水面，待废液出口处再无废液排出后，将它接到10ml量筒（量筒1）内（注意：保持一段水封）。在另一量筒（量筒2）内注入10ml水，在与10（1）款相同条件下，将毛细管插入水中直至10ml水全部吸喷完毕，待废液管中再无废液排出后，测量排

出的废液体积 V(ml)，并计算表观雾化率（ε）。

$$\varepsilon=\frac{10-V}{10}\times 100\%$$

11. 背景校正能力检定

（1）对于仅有火焰原子化器的仪器，在 Cd228.8nm 波长下，先用无背景校正方式测量，调零后将屏网（吸光度为 1）插入光路，读下吸光度 A_1，再将测量方式改为有背景校正方式，调零后，再把屏网插入光路，读下吸光度 A_2。

（2）对于带石墨炉的仪器，将仪器参数调到石墨炉法测镉的最佳状态，以峰高测量方式先进行无背景校正测量，用移液管加一定量的氯化钠溶液（该溶液浓度为 5.0mg·ml^{-1}），使产生的吸收信号在 1A 左右，读下吸光度 A_1，再用有背景方式测量，加入相同的氯化钠溶液并读下吸光度 A_2。

（3）按 11（1）和 11（2）测出的 A_1 和 A_2，计算出 A_1/A_2 值应符合第（一）（9）条的规定。

12. 绝缘电阻检定

用 500V 兆欧表测量电源线与仪器外壳之间的电阻，应符合（一）（10）条的规定。

（四）检定结果处理和检定周期

（1）经检定合格的仪器，发给检定证书；检定不合格的仪器，发给检定结果通知书。

（2）对使用中或修理后的仪器，在所列的检定项目中，以基线稳定性、精密度和检出限（石墨炉还包括特征量）为主要项目。这几项中有一项不合格，则整机计量性能为不合格；如这几项合项，而其他个别项目不合格，但又不影响使用，可以发给检定证书，但必须在证书背面“结论”一栏中注明不合格的项目名称，或注明该仪器允许在什么情况下使用。

（3）检定周期为 2 年，修理后的仪器应随时进行检定。

四、国内外常用原子吸收分光光度计的型号与性能

表 6-28 列出了近几年国内外生产的原子吸收分光光度计的型号与性能，仅供参考。

表 6-28 国内外常用原子吸收分光光度计的型号与性能

性能 \ 厂商型号		美国 PERKIN ELMER（珀金-埃尔默中国公司）		
		AAnalyst 300	SIMAA 6000	5100ZL
测定原理	光学系统	光双束系统（交流）		高稳定性双光束系统
	元素灯	6 灯自动转换	全自动同时测 6 种元素	6 灯自动转换
单色器	光栅	大面积双闪耀波长光栅（1800 条/mm）	四面体中阶梯光栅光学系统	两块不同闪耀波长大面积光栅（210nm，580nm）
	波长范围	185～869nm		
	光谱带宽	0.2，0.7，2.0nm		
	线性色散倒数	1.6nm/mm		
	焦距	274nm		
原子化器	原子化方式	火焰—石墨炉快速转换	石墨炉	火焰-石墨炉
	背景消除	高强度氘灯	纵向交流塞曼效应	两种自动转换的连续光源（氘灯、碘钨灯）为火焰系统进行全波段背景校正，石墨炉系统采用纵向交流塞曼校正
	灵敏度	—		
微机系统	软件环境	DEC 575 奔腾 CPU 8 兆内存，845 兆硬盘，VGA 显示		
规格	尺寸	410(h)×680×990(W)mm		
	重量	68kg		
电源		200～240V 50/60Hz		

续表

厂商型号 / 性能	美国 PERKIN ELMER（珀金-埃尔默中国公司）		
	AAnalyst 300	SIMAA 6000	5100ZL
主要特点	由工业标准化计算机控制，实现了全方位自动化，稳定性优越，可自动顺序测定多达 20 个元素/项目	最先进的横向加热石墨炉技术，最佳的等温平台技术使高低温元素同时完全原子化，多元素测定具有单元素分析的检出限	具有 USS—100 超声波悬浮液固体进样装置供石墨炉直接分析固体样品

厂家型号 / 性能		美国瓦里安公司（Varian）		
		Spectr AA 100/200	SpectrAA 640	SpectrAA 800
测定原理	光学系统	单光束或双光束	双光束	双光束
	元素灯	手动或自动 4 灯架	手动 4 灯或自动 8 灯	手动 4 灯或自动 8 灯
单色器	光栅	250mm Czerny-Turner 单色器	330mm Czerny-Turner 单色器	330mm Czerny-Turner 单色器
	波长范围	190～900nm	190～900nm	190～900nm
	光谱带宽	0.2～4.0nm	0.2～4.0nm	0.2～4.0nm
	线性色散倒数			
	焦距			
原子化器	原子化方式	火焰—石墨炉快速更换	火焰法、石墨炉法、塞曼效应石墨炉、氢化物法	火焰法、石墨炉法、塞曼效应石墨炉法、氢化物法
	背景校正	高速 D_2 背景校正	塞曼效应背景校正	塞曼效应背景校正
	灵敏度			
微机系统	软件环境	采用流行的 Microsoft windows 操作系统		
规格	尺寸重量			
电源				
主要特点		自动单元素或半自动多元素分析，具有强有力的数据质量控制及“promt”测量技术	多达 20 个元素的自动多元素分析，可以贮存和处理信号图形，火焰法允许在线浓度稀释，背景信号多点内插校正	在线浓度稀释，燃烧头自动调节，自动添加改进剂和稀释样品，半自动或全自动多元素分析

厂家型号 / 性能		美国热电佳尔—阿许公司（Thermo Jarrell Ash-UNICAM）			
		SOLAAR929	SOLAAR939/939E/959	SOLAAR 939Z	SOLAAR 939QZ
测定原理	光学系统	Stockdale 双光束方式或单光束			
	元素灯	单灯座或四灯座			
单色器	光栅	全息母光栅			
	波长范围	180nm～880nm			
	光谱带宽	0.2，0.5，1.0nm			
	线性色散倒数	狭缝 0.2，0.5nm 可调			
	焦距				
原子化器	原子化方式	火焰-石墨炉	火焰石墨炉	火焰石墨炉	火焰-石墨炉
	背景校正	氘灯-塞曼效应	氘灯扣背景	反相塞曼效应扣背景	标准 QuadLine 氘灯扣背景和塞曼效正背景校正以及二者结合背景校正
	灵敏度	10cm 燃烧头：5ppm Cu>1.177 吸光度 RSD≤0.3% 5cm 燃烧头：5ppm Cu>0.985 吸光度 RSD≤0.4%			
微机系统	软件环境	80486DX-33MHz 内存 8MB 或 8MB 以上 硬盘 200MB 或 200MB 以上，显示器 SVGA 微软 Windows 3.1，DOS 5.0 或更高			
规格	尺寸	785(W)×467(H)×582(D) mm	1020×517×645 mm	1020×517×645 mm	1020×517×645 mm
	重量	70kg	85kg	90kg	90kg
电源		110/120,220/240V 50/60Hz	110/120V,220/240V 50/60Hz	220/240V 50/60Hz	220/240V 50/60Hz
主要特点		内置微机，可进行全自动控制，显示工作曲线及存储方法，最优性能价格比	全自动波长，带通、气体控制，数字式电路采用电子校准，自动性更强，速度更快，具有高度重现性和精密度	可自动检测 16 种元素，与连续流动蒸汽系统相连可方便适用于氢化物分析	先进的自动进样系统和独特的长寿命石墨管的完美结合，确保分析结果更好的重现性和更低的运行成本

续表

性能 \ 厂家型号		岛津制作所(SHIMADZU)		
		AA-6200	AA-6501/6401	AA-6701/6601
测定原理	光学系统	双光束(暂光镜)	双光束	双光束
	元素灯	手动,2个灯可同时点亮	8灯,同时点亮2个	8个,同时点亮2个
单色器	光栅	全息(1600条/mm)	全息	全息
	波长范围	190～900nm	190～900	190～900
	光谱带宽	狭缝0.2,0.7nm(手动)	0.1 0.2 0.5 1.0,2.0.5.0nm 自动切换	0.1,0.2,0.5,1.0,2.0,5.0 nm、自动切换
	线性色散倒数			
	焦距			
原子化器	原子化方式	火焰法	火焰-石墨炉	火焰-石墨炉
	背景校正	氘灯法	SR法、D_2灯法	自吸收扣背景(SR)法 D_2 灯扣背景
	灵敏度	测铬 RSD<0.5%	火焰:4ppm Cu>0.60 Abs 石墨炉:5ppbPb20μl 0.14Abs 以上	火焰:4ppm Cu>0.45Abs 石墨炉:1ppb Mn20μl 0.18Abs 以上
微机系统	软件环境	MS-Windows TM95 或 MS-Windows 3.1 486/66 以上 内存16MB以上,硬盘120MB以上。VGA 显示器	Ms-Windows 3.1 80486DX-33 以上,RAM:8MB HDD:120MB CRT:YGA	MS-Windows 3.10 80486DX-33 以上 内存8MB以上 硬盘 120MB 以上,VGA 显示
规格	尺寸	690×425×370(mm)		
	重量	38kg		
电源		AC 220V 50Hz 300VA		
主要特点		操作简单、结构紧凑、性能价格比高	任意选择最适合的背景校正方法、自动设定最佳火焰高度和燃气比,人工智能化的干燥温度控制	具有自动稀释,混合功能的自动进样器,每个元素的测试结果按样品重新排列,能够显示/打印,自化程度高、省力

性能 \ 厂家型号		HITACHI 日本日立仪器制作所			澳大利亚 GBC 科学仪器公司照生有限公司		
		Z-5000	Z-5300	Z-5700	AVANTAE 型	AVANTA 型	932/933 型
测定原理	光学系统	双光束系统			不对称双光束	不对称双光束	双光束/单光束
	元素灯	8灯座,同时点灯2个 自动切换			8灯座	4灯座	2灯座
单色器	光栅						
	波长范围	190～900nm			185～900nm		
	光谱带宽						
	线性色散倒数						
	焦距						
原子化器	原子化方式	火焰-石墨炉	火 焰	石墨炉	火焰-石墨炉		
	背景校正	塞曼效应	塞曼效应	塞曼效应	超脉冲背景校正		
	灵敏度				55ppm Cu>0.7ABS RSD<0.5%(10s 积分)		
微机系统	软件环境	windows®95 16MB 内存 50MB 硬盘 VGA 彩色显示			全鼠标 windows'95 操作平台		
规格	尺寸	1150(W)×650(D)×500(H)nm					
	重量	240kg	185kg	210kg			
电源		220/230/240V 7KVA	115/220/230/240V 0.2KVA	220/230/240V 7KVA			
主要特点		采用 windows®95 使操作简单易行,可自动控制温度、时间、气体流速、分析结果一目了然			带有 FS3000 火焰自动进样器,HG3000 氢化物发生器和 EHG 电加热头以及石墨自动进样器		

性能 \ 厂家型号		惠普上海分析仪器有限公司		
		3200 型	3208 型	3500G
测定原理	光学系统	双光束系统	双光束系统	单光束全波段消色差光路
	元素灯			
单色器	光栅	平面衍射光栅 1200条/mm	平面衍射光栅 1200条/mm	平面衍射光栅 1200条/mm
	波长范围	190～860nm	190～860nm	190～860nm
	光谱带宽	0.2,0.4,0.7,1.4,2.4,5.0nm	0.2,0.4,0.7,1.4,2.4,5.0nm	0.2nm,0.7nm,14nm
	线性色散倒数			2.38nm/mm
	焦距	350mm	350mm	350mm

续表

性能 \ 厂家型号		惠普上海分析仪器有限公司		
		3200 型	3208 型	3500G
原子化器	原子化方式	火焰-无火焰	火焰-无火焰	火焰
	背景校正	氘灯法	氘灯法	输出原子吸收和背景吸两路信号
	灵敏度	带宽 0.2nm 分开 Ni 三线 231.6,231.0,232.0nm	带宽 0.2nm 分开 Ni 三线	带宽 0.2nm 分开 Ni 三线
微机系统	软件环境	四位数字显示 配接记录仪	PC 机进行数据处理	PC 机进行自动控制机内有可作图打印机配有 RS-232 接口
规格	尺寸 重量			1000×550×480mm
电源		220V±22V 50Hz	220V±22V 50Hz	220V±22V 50Hz
主要特点		具有峰值积分、浓度直读、自动增益、自动调零曲线校直、条件设定功能、独特的快速气体转换控制和雾化室安全防护装置	具有线性法、非线性法、标准加入法、非线性标准加入法，具有 1～5 点浓度校正，显示打印、存贮或调用分析条件、校正曲线、峰形图标和分析结果	信号处理等均由计算机控制，具有 1～5 点浓度校准、斜率重调、精密内插法、标准加入法，具有瞬时、积分峰高、峰面积四种读数方法

性能 \ 厂家型号		上海第三分析仪器厂		
		360 型	360MC 型	360CRT 型
测定原理	光学系统	单光束	单光束	单光束
	元素灯	一个工作灯，一个预热灯	2 个灯	2 个灯
单色器	光栅	大孔径强光单色器		
	波长范围	190～860nm	190～860nm	190～860nm
	光谱带宽	0～2.0nm 连续可调	0～2.0nm 可调	0～2.0nm 可调
	线性色散倒数			
	焦距			
原子化器	原子化方式	火焰	火焰	火焰
	背景校正	氘灯法	氘灯	氘灯
	灵敏度	明显分辨锰双线(0.2nm)	明显分辨 Mn 双线	明显分辨 Mn 双线
微机系统	软件环境	4 位 LED 红色数码显示满码"1999"，2V 模拟信号输出	4 位 LED 红色数显，满码"9999"直读(τ、A、C 及 RSD)，40 列 4 色打印绘图仪，记录仪(2V,1V)	外接 IBM-PC 机或完全兼容机
规格	尺寸			
	重量			
电源		220V/110V 50/60Hz	220V/110V 50/60Hz	220V/110V 50/60Hz
主要特点		具有高能量、高灵敏度、高稳定性和极高的性能价格比。系统紧凑、一体化	自动扣除空白，自动漂移校正、自动灵敏度漂移校正、自动计算 RSD，自动打印数据、曲线及分析报告	机内设有咨询系统，提供被测对象的情况咨询服务供参考，用户也可将自己的参数存入其中

性能 \ 厂家型号		北京分析仪器厂光谱公司		北京苏晖仪器有限公司(外商独资)	
		GFU-202C	GFU-204	AAS9400/9402/9440/9442	AAS9502/9542/9502C/9542C
测定原理	光学系统 元素灯	双光束	单光束	单光束 双灯(一工作，一预热)	单光束 双灯
单色器	光栅		色谱光栅 $S_0=50\times50mm^2$ $\lambda_0=250nm$	Czerny-turner 单色器 $50\times50mm^2$ 1200 条/mm	Czerny-turner 型 1200 条/mm
	波长范围	190～860nm	190～860nm	190～900nm	190～900nm
	光谱带宽		0.1,0.2,0.4,1.0nm	0.2,0.4,1.0,2.0nm	0.2,0.4,1.0,2.0nm
	线性色散倒数				
	焦距			350mm	350mm
原子化器	原子化方式	火焰或石墨炉	火焰	火焰	火焰-无火焰(石墨炉)
	背景校正	氘灯	氘灯	氘灯(9400,9440 除外)(190～350nm 范围内)	氘灯(190～480nm 范围)
	灵敏度	5μg/ml Cu>0.600A 吸光度	在 λ=232.0nm 处分开 Ni 三线		

续表

性能 \ 厂家型号		北京分析仪器厂光谱公司		北京苏晔仪器有限公司(外商独资)	
		GFU 202C	GFU-204	AAS9400/9402/9440/9442	AAS9502/9542/9502C/9542C
微机系统	软件环境	标准 RS-232C 接口及 PC 机、CRT 人机对话系统 280 配 24 针打印机彩显	280 六位 LED 显示 16 列针式打印机	采用适用 386 微机	采用适用 386 微机
规格	尺寸			950×570×440 mm	950×570×440 mm
	重量			120kg	120kg
电源		220V 50Hz	220V 50Hz	AC 220V 50Hz 150VA	AC 220V 50Hz 150VA
主要特点		分析方式可采用单、双光束、背景吸收、火焰发射，光学系统采用透射反射结合、兼有双光束的稳定性和单光束的光能充足	价格低廉，有较高的性能价格比	设计合理、操作简便，专用汉化窗口软件，画面简洁，指示明确、数据处理优化平滑，提高了测试精度	AAS95 全部系统通过微机进行控制，石墨炉升温曲线图形显示，有多种升温方式可供选择

性能 \ 厂家型号		北京瑞利分析仪器公司(北京第二光学仪器厂)			
		WFX-1C/1D	WFX-100A	WFX-1E2	WFX-1F2B2
测定原理	光学系统 元素灯	单光束 2 只同时供电	单光束 2 只灯	单光束 2 只灯	单光束双透镜 2 只同时供电
单色器	光栅	Ebert 型 1200 条/mm	C-T 型平面闪耀光栅 1200 条/mm	Ebert 型 1200 条/mm	Ebert 型平面闪耀光栅 1200 条/mm
	波长范围	190～900nm	190～860nm	190～860nm	190～900nm
	光谱带宽	0.2、0.4，1.0，2.0nm	0.1，0.2，0.4，2.0nm	0.2，0.4，1.0，2.0nm	0.1，0.2，0.4，2.0nm
	线性色散倒数				
	焦距	400mm	400mm	400mm	400mm
原子化器	原子化方式	火焰/火焰-石墨炉	火焰-石墨炉	火焰-石墨炉-氢化法	火焰-石墨炉-氢化法
	背景校正	无/氘灯	氘灯和自吸背景校正	氘灯	氘灯和自吸背景校正
	灵敏度		0.05mg/lCu 检出限 0.008mg/l RSD≤1%	优于专业标准规定值	优于专业标准规定值
微机系统	软件环境	IBM486 及各种兼容机、读数用 LED 显示、也可选用记录仪	486 微机自动数据、图像处理	内置专用并行接口，可外接 PC 机、LED 显示能量及测量值	采用 386 计算机进行数据处理，高分辨彩色 CRT 显示测量数据与各种信息图形
规格	尺寸	1C：1150×370×510mm 1D：510×330×825mm	860×510×550mm	529×435×1013mm	529×435×1013mm
	重量	110kg/100kg	70kg	100kg	100kg
电源		1C：220V/110V 50/60Hz 1D：380V 50Hz	220V、50Hz、5A	380V、50Hz	380V(单相)、50Hz
主要特点		良好基线稳定性，高精密度，设计精良，操作迅速简便	微机控制波长自动扫描，分析方式方便切换、狭缝自动换挡操作简便安全	电学系统设计新颖，具有高稳定性和高可靠性，使用功能齐全，可配附件多，可提高分析性能	微机控制仪器参数调整，波长电动扫描、自动点火，采用 386 计算机进行数据处理，功能进一步扩展

性能 \ 厂家型号		北京地质仪器厂		
		GGX 4	GGX-5	GGX-6A
测定原理	光学系统 元素灯	双光束	双光束	双光束
单色器	光栅	50×50mm² 1200 条/mm	1200 条/mm 50×50mm²	1200 条/mm
	波长范围	190.0～900.0nm	190.0～900.0nm	190～900nm
	光谱带宽	0.1，0.2，0.4，1.0，2.0nm	0.1，0.2，0.4，1.0，2.0nm 手动	0.1，0.2，0.4，1.0，2.0nm
	线性色散倒数			
	焦距	400mm	400mm	400mm
原子化器	原子化方式	石墨炉	火焰	火焰
	背景校正	恒定磁场塞曼效应	氘灯	塞曼效应
	灵敏度	可分开 Ni 三线	分开 Ni 三线	分开 Ni 三线
微机系统	软件环境	可输出 数字显示 打印输出 模拟输出	数字显示、打印输出、模拟输出	数字显示，打印输出、模拟输出

续表

厂家型号 / 性能		北京地质仪器厂		
		GGX-4	GGX-5	GGX 6A
规格	尺寸	900×448×450mm	900×448×450mm	900×448×450mm
	重量	100kg	100kg	100kg
电源		200V±10% 150W	Ac. 220V, 150W	Ac. 220V、70W
主要特点		操作简便快速,测定准确	可通过微机借助键盘和数字显示,打印输出实现人机对话方式操作	灯的漂移自动扣除,基线稳定性更好,火焰和喷雾所造成的噪声基本能消除

参考文献

1 邓勃编著．原子吸收分光光度法．北京:清华大学出版社,1981

2 李超隆．原子吸收分析理论基础(上册)．北京:高等教育出版社,1988

3 魏复盛,齐文启编著．原子吸收光谱及其在环境分析中的应用．北京:中国环境科学出版社,1988

4 马怡载,何华焜,杨啸涛编著．石墨炉原子吸收分光光度法．北京:原子能出版社,1990

5 李述信主编．原子吸收光谱分析中的干扰及消除方法．北京:北京大学出版社,1987

6 杭州大学化学系分析化学教研室编．分析化学手册．第一版,第三分册,北京:化学工业出版社,1983

7 李玉珍、邓宏筠编著．原子吸收分析应用手册．北京:北京科学技术出版社,1988

8 穆家鹏编译．原子吸收分析方法手册,北京,原子能出版社,1989

9 朱良漪主编．分析仪器手册,北京:化学工业出版社,1997

10 Robinson J W. Practical Handbook of Spectroscopy. Boca Raton: CRC Press, 1991

第七章　原子吸收光谱法的实验技术

第一节　进 样 技 术

一、火焰原子吸收光谱法的进样技术

在火焰原子吸收光谱法（FAAS）中试样溶液是通过喷雾器导入火焰，其灵敏度在很大程度上取决于喷雾器的工作状态，因此喷雾器的设计、制造和调整十分重要。目前在FAAS中样品的导入技术主要有3种：脉冲进样、原子捕集技术和流动注射技术。脉冲进样技术因取样量少而特别适于少量样品及高盐分样品分析，郑永章[1]等首先介绍了这种方法，柳志龙等[2]探讨了脉冲进样技术的雾化效率。应用这种技术的测定实例有：稀土化合物中的铜、铅、铁、镍的测定[3]；金基、银基中铜、锰的测定[4]；Pb的测定[5]；血浆[6]和血清[7,8]中Zn的测定；高纯电解铜中Fe的测定[9]等。

原子捕集技术常用来提高FAAS的灵敏度，其原因是可使待测元素在火焰中停留时间较长。此项技术越来越多被国内工作者采用。Lau等[10]提出的原子捕集技术是把外径4mm的石英管（可通入冷水或空气）放在火焰中，在燃烧头上方（5～10）mm处，通入冷水；此时吸喷待测溶液，待测元素即被捕集在冷水石英管上，通入空气排除管中冷水后，管子被迅速加热，被捕集的元素即被原子化。有些文献[11～13]介绍了这种方法。Watling[14]等发展了用于火焰原子吸收的缝管法：在一根长约120mm，外径（10～12）mm的石英壁上开两条长（50～100）mm，宽度分别为3mm和7mm的长缝，缝间位置可以是相对的，也可以有一定角度，用夹具放于燃烧头上方约5mm处，3mm的缝为火焰入口。国内首先介绍这方法的是文献[15]。关于FAAS法中的原子捕集技术已有综述文献[16,17]，有人提出了先在较小乙炔流量时进行捕集，然后在捕集结束后迅速加大乙炔流量，进入瞬间释放的二阶段法[18]。有人建议用石墨管代替石英管。使用原子捕集技术的测定实例有：测定血清及铝中铅[19]和锌[20]、镉[21,22]、镓[23]、银[24]；测定水中超痕量Ni[25]及Cu[26]。用改进后的缝式石英原子捕器测定Ag、Ak、Cu、Pb、Zn、Bi、Ga和Sb[27～29]。用单缝石英管测定大米中Cu[30]；大米、茶叶、蒜头中微量Se[31]；水中Se[32]；水中Cd[33]，纯锡中Bi和Sb[34]，火药烟晕中Pb和Sb[35]；酒类及水中Pb[36]；维生素B_{12}(Co)[37]及人发中Cu[38]等。

流动注射技术将在第七节中介绍。

二、无焰原子吸收光谱法的进样技术

（一）液体试样[39]

1. 微量进样器

主要用微量注射器和全塑微量进样器吸取液体试样注入原子化器，一般使用（1～100）μl的微量进样器，有固定和可变体积的两种，可变体积进样器精度见表7-1。

在使用中要注意：在同次实验中，选用材料相同吸管；及时更换吸管尖；吸管尖外部残存试液每次都要用新的试纸擦净；样品要加到进样孔相对的管壁部位，不要碰着管壁，每次

表 7-1　可变体积进样器的精度

标出体积/μl	实际进样量/μl	相对标准偏差/%	标出体积/μl	实际进样量/μl	相对标准偏差/%
10.0	9.7	2.7	100.0	99.3	0.5
20.0	19.6	1.9	150.0	150.1	0.6
50.0	49.7	0.7	200.0	200.5	0.6

进样位置保持一致。

2. 自动进样器

采用自动进样器使进样位置，液滴大小、形状保持一致，可提高测量精度。

3. 雾化淀积法

该方法将试液按设定时间喷入加热到（150～175）℃的石墨管中。气溶胶遇到加热的石墨管壁，瞬间蒸发，溶质沉积于管壁，喷入速度通过调节喷雾器选择，一般进样量为 $2\mu l \cdot s^{-1}$。这种方法由于溶剂不断蒸发，溶液不会在石墨管中流散。

4. 其他进样方法

将样品溶液附着在钽丝、钨丝、铱丝、铜线或者石墨电极上，干燥后放入原子化器，或将其浸入试液中电解，使待测元素沉淀在电极上，将电极插入原子化器测定。

（二）固体样品

分析固体试样时，一般将试样置于小钽舟中，称量后放入炉中，翻转钽舟，将试样倒人石墨炉的正中央。也有直接放入石墨杯，金属舟或者石墨平台，直接放入原子化器测定的。还可将试样和石墨粉混合后放人原子化器。Kurfürst 报道了固体自动进样系统[40]固体及悬浮液进样由于省去样品前处理而受到欢迎。马玉平自制微量固体进样装置[41]。在悬浮液进样技术中，选择适当的悬浮剂，制成均匀，稳定的悬浮液十分重要，有文献介绍以甘油、硝酸和水按（1+0.05+4）混合制成悬浮剂[42]、以琼脂作悬浮剂[43]，用黄原胶作稳定剂将米粉样品制成悬浮液[44]，以 20%乙醇－1%硝酸水溶液作悬浮剂等[45]。悬浮液的制备可用超声波装置[46]。L'vov 在华讲学时介绍将金属样在介电常数较大的液体中进行火花放电以制备悬浮液。采用悬浮液进样法的测定实例有：纯稀土氧化物中 Ca[47]测定；高纯三氧化二铝中 K、Na、Ca、Mg、Fe、Cr、Mn、Ni 的测定[48]；大米中 Cu[49]，面粉中 Pb、Cd[50]和 Se[51]，蔬菜中 Cu[52]和 Cr[53]，贻贝样品中 Pb、Cd、Cu[54]，面粉，米粉中 Pb[55]，Pb 和 Cd[56]，饲料中痕量 Co[57]。水中痕量 Ag 等的测定[58]。

第二节　原子吸收光谱分析中背景校正技术

火焰和无火焰两种原子化方法背景吸收的主要来源是相同的，即分子吸收和散射背景。在火焰原子吸收中还存在火焰气体的吸收和介质中无机酸的吸收。根据背景吸收的特点，为了正确的校正背景必须满足以下三点要求：①必须在分析线同一波长处测量背景；②在测量原子吸收信号的同时测量背景吸收信号；③要求两个光束在原子化器中完全重合，即要求测量的分析体积相同。至今，原子吸收光谱法中，无论是商品仪器、还是实验室研究装置，对于背景的校正都是通过两次测量完成的。即一次在分析波长测量原子吸收信号和背景吸收信号的总和，另一次在分析波长或邻近波长测量背景吸收信号，两次测定的差值即为扣除背景后的净原子吸收信号。可表示为

$$A=(A_{1a}+A_{1b})-(A_{2a}+A_{2b})$$

式中，A_{1a}和 A_{1b}为第一次测得的原子吸收和背景吸收；A_{2a}和 A_{2b}为第二次测得的。上式整理得

$$A=(A_{1a}-A_{2a})+(A_{1b}-A_{2b})$$

如果 $A_{1b}=A_{2b}$，$A_{2a}=0$，则 $A=A_{1a}$，这是理想的背景校正结果。若 $A_{2a}=0$，$A_{1b}>A_{2b}$则校正不足；$A_{2b}>A_{1b}$则校正过度。若 $A_{1b}=A_{2b}$，$A_{2a}>0$，此时引起分析灵敏度降低。若 $A_{1b}\neq A_{2b}$，$A_{2a}\neq 0$，此时既不能正确校正，又降低分析灵敏度。随着原子吸收光谱分析技术的发展已有许多背正校正方法[59~61]，使用广泛并已成为商品的有连续光源法（即氘灯法）、塞曼法、自吸收法和双波长法。

一、连续光源法（氘灯法）

连续光源法是 Koirtyohann 和 Pickett 在 1965 年首先提出来的。现用 A_H 表示空心阴极灯辐射通过原子化器时测得的吸光度值，A_D 表示氘灯时的情况，由上述原理得

$$A_H=A_{a(H)}+A_{b(H)}$$

$$A_D=A_{a(D)}+A_{b(D)}$$

理论研究证明：$A_{a(D)}=2.4\dfrac{\Delta\nu_L}{\Delta\nu}A_{a(H)}$，式中 $\Delta\nu_L$ 为洛仑兹半宽度，约为 0.002nm，$\Delta\nu$ 为单色器的光谱通带宽度，设为 0.2nm，则有

$$A_{a(D)}\approx 0.02A_{a(H)}$$

背景校正后的吸光值是

$$A=A_H-A_D=(A_{a(H)}-A_{a(D)})+(A_{b(H)}-A_{b(D)})$$

假设 $A_{b(H)}=A_{b(D)}$

$$A=0.98A_{a(H)}$$

可见背景得到扣除，而灵敏度没有明显降低。

由于这种方法使用了两个不同性质的独立光源，对于上述正确校正背景的三点要求都不能满足。该方法的不足主要在以下方面：

①由于氘灯是连续光源，测得的是单色器光谱通带的平均背景值（$A_{b(D)}$），而空心阴极灯是锐线光源，测得的背景吸收是分析波长处的背景($A_{b(H)}$)，所以关于 $A_{b(H)}=A_{b(D)}$的假设是不严格的。

②两个光源的光斑大小不同，光斑本身的能量分布也不同，而空心阴极灯光斑大小又随元素不同而异，因此这种方法对空间特性很强的石墨炉原子吸收中的背景吸收信号难以准确校正。

③空心阴极灯和氘灯的发射强度不同，前者强，后者弱，为使两束光能量相等或接近相等，要求单色器的光谱通带不小于 0.2nm。这样基体元素的吸收线，光源发射的非吸收线或吸收灵敏度低的谱线可能进入光谱通带内，造成扣除背景的误差和其他光谱干扰。

④只适用于氘灯辐射较强的波长范围，一般为（190～350）nm，如采用热阴极氘弧灯，可使背景校正的波长范围扩展到 Ca 422.7nm，

⑤原子吸收信号与背景吸收信号不是同时测定，此时背景校正误差正比于采样周期（即时间差）Δt。Δt 愈小，误差愈小。

连续光源法扣除背景吸光度值一般范围是 0.4～1，噪声和漂移较大，有一定的局限性。

二、塞　曼　法

塞曼法扣除背景的原理在上一章有关介绍塞曼效应原子吸收分光光度计时已简要介绍过

了。塞曼法能在共振吸收线同一波长处校正背景，它不仅对连续背景、具有精细结构的分子光谱背景以及邻近某些共存原子吸收谱线，乃至某些重迭的原子吸收线背景都能校正。对于正常塞曼效应，只要磁场强度的大小能够把 π 和 σ 两组分互相分开，对灵敏度无影响。对于反常塞曼分裂谱线中，在磁场作用下两组分不能完全分开的分析线，其灵敏度低于一般原子吸收法。有关塞曼法扣背景能力的研究见有关文献[61]。

三、双 波 长 法

这种方法是用共振吸收线测定原子吸收与背景吸收之和，另选一条非吸收线测定背景吸收之和，二者之差即为扣除背景后的原子吸收值。使用这种方法时要注意：①必须确保测量背景用的谱线是非吸收线，否则造成扣除过度；②所选用波长与待测元素吸收线的波长必须靠近，须经过实验，使得两次测量的背景吸收信号相等；③所用的谱线必须有足够的强度，以保证良好的信噪比。对于没有背景校正器的仪器可以用这种方法，但对于单道仪器而言扣除背景效果差。使用双道原子吸收分光光度计可以克服单道仪器的缺点，它可以同时测定原子吸收信号与背景信号。此法对石墨炉中瞬态信号的观测优于其他方法。又因为使用了同一光源，样品光束和参比光束完全重叠，因此此方法能准确观测同一吸收层中发生的现象。但双道仪器复杂，价格也较贵。

双波长法中对于非共振吸收线的选择是最重要的，所选的谱线可以是被测元素本身的非吸收线，也可以是其他元素（如惰性气体、阴极材料的发射线等）的谱线，表 7-2、表 7-3 列出了大多数元素用双波长法背景校正时所用的分析线对。

表 7-2 双波长法背景校正分析线对（一）

测定元素	分析线 λ/nm	校 正 线 λ/nm	测定元素	分析线 λ/nm	校 正 线 λ/nm
Ag	328.07	Cu 327.40; Ag 293.86, 312.28; Zn 328.2; In 325.7; Pd 325.1[③], 326.0[④]	Cu		Ne 323.0; Fe 323.0[⑤]; Mn 322.8[⑤]; Cu 249.1; Pd 325.1[③], 326.0[④], 324.3[③]
Al	309.27	Mg 313.16; Au 312.2; Pt 306.5; Al 307.0	Fe	248.33	Cu 249.21
As	197.20	As 198.97, 202.0; Ne 191.6			Fe 251.1; Fe 247.3; Mn 249.1[⑤]; Pd 247.6; Pd 248.8[⑥]; Zn 249.1[③]; Pt 248.7
	193.7	As 192.0	Hg	253.65	Al 266.92; Mn 252.7; Cu 249.2
Au	267.60	Pt 265.95	In	303.94	In 305.12
	242.80	Mn 249.1[③]; Zn 249.1[④]; Pt 244.0; Pt 240.3; Co 240.7	K	766.49	Pb 763.22; Ar 763.5; Ba 767.2
B	249.67	Cu 244.16			K 769.9
Ba	553.55	Ne 556.28; Mo 553.3; Y 557.6		404.4	Pb 405.7[③,⑩]; Fe 407.3
Be	243.86	Cu 244.16; Sn 235.4	Li	670.78	Ne 671.70
Bi	306.77	Al 307.29; Bi 298.90; 227.66	Mg	285.21	Mg 280.26, 281.7; Cu 282.44; Sn286.3, 283.9; Ne 281.7; Pt 283.0; Cd 283.7
	223.06	Pb 220.4[③]; Pd 225.5[④]; Te 225.9; Cd 226.5	Mo	313.26	Mo 311.22
Ca	422.67	Ne 430.40; Ar 420.0; Cu 423.9[③⑤]; Sr 421.5; Pt 418.7; Fe 421.9, 423.6	Mn	279.48	Mn 257.6; Cu 282.44; Co 279.5[③]; Bi 280.9[⑤]; Sb 276.2; Pd 276.3, 279.2; Pb 280.1
Cd	228.80	Cd 226.50; Pt 228.8[⑥]; Sb 231.1[⑦]; Pd 225.3, 229.6[⑩]	Na	330.23 588.99	Ne 336.98; 585.25; 588.1; Ar 591.2
	326.1	Zn 325.6	Ni	232.00	Ni 231.60, 231.40; Cu 282.44; Pb 229.6[⑩], 232.2
Co	240.72	Co 241.16, 241.44, 238.3; Au 242.8[③]; Pd 240.0; Pt 240.3	Pb	283.31	Pb 280.20, 282.32, 282.0, 220.4;
Cr	357.87	In 325.6; Ar 358.27, 358.24; Ne 352.0, 357.0[⑩]; Pb 357.2; Ne 359.4; Ti 364.3			
Cu	324.75	Cd 326.11; Cu 323.12, 296.1;			

续表

测定元素	分析线 λ/nm	校正线 λ/nm	测定元素	分析线 λ/nm	校正线 λ/nm
Pb	217.0	Sb 217.6; Pt 216.5, 217.8①	Sr	460.73	Ne 453.78
	246.7	Fe 248.3	Ti	364.26	Ne 352.05
P	213.5 /213.6	Zn 212.5	Tl	276.79	Ne 277.50 Tl 323.00
Pd	247.64	Pd 247.70, 247.75; Si 251.6; Mn 249.1; Zn 249.1⑬; Cu 249.2	V	318.34 318.40	V 319.98
Pt	255.95	Pt 264.69; Zn 268.4	W	255.10 255.14 255.20	W 255.48
Sb	217.59	Sb 217.93, 215.2; Cu 215.18; Pb 217.0⑫; Pt 216.5, 217.8			
Se	196.03	Se 203.99, 198.1	Zn	213.86	Zn 210.22, 210.4; Cd 228.80; Cu 219.28, 213.6, 216.6⑬; Fe 214.3; Sb 217.6
Si	251.63	Cu 252.67, 252.66			
Sn	224.61	Sn 285.06; Cu 224.70, 224.91			

① Sn>2000μg·ml⁻¹时干扰。

② 1000μg·ml⁻¹Au对该线不吸收。

③ 高至1000μg·ml⁻¹Bi、Co、Cr、Fe、Mn、Ni、Pb、Pd、Pt对该线不吸收。

④ 高至10000μg·ml⁻¹Al、Bi、Ca、Cd、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Pb、Sb、Sn、Zn对该线不吸收。

⑤ 1000μg·ml⁻¹Ca对该线不吸收。

⑥ 10μg·ml⁻¹Cd产生1%吸收。

⑦ Sb量要低于0.2μg·ml⁻¹，Ni量要低于200μg·ml⁻¹时才能使用。

⑧ 200μg·ml⁻¹Mn产生1%吸收。

⑨ Mn高于2000mg·L⁻¹时干扰。

⑩ 1000μg·ml⁻¹K对该线不吸收。

⑪ Fe高于1000μg·ml⁻¹时有干扰。

⑫ Pb量要低于10μg·ml⁻¹。

⑬ Cu有干扰。

表7-3 双波长法背景校正分析线对（二）

元素	分析线 λ/nm	非共振吸收线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	非共振吸收线 λ/nm	元素	分析线 λ/nm	非共振吸收线 λ/nm
铝	309.3	Al 307.0	镍	232.0	Ni 231.4	镧	550.1	Mo 550.6
锑	217.6	Sb 217.9	钯	247.6	Cu 249.2		550.1	Co 548.4
	231.2	Ni 231.4	磷	213.5/213.6	Zn 212.5	铅	283.3	Pb 280.1
砷	193.7	As 192.0	钾	766.5	Ba 767.2		283.3	Cd 283.7
钡	553.6	Ne 540.0		766.5	K 769.9		217.0	Pb 220.4
	553.6	Mo 553.3	铑	343.5	Rh 350.7	硒	196.0	Se 198.1
	553.6	Y 557.6		343.5	Ne 352.0	硅	251.6	Cu 249.2
铍	234.9	Sn 235.4	铷	780.0	Ba 778.0	银	328.1	Ne 332.4
铋	223.1	Cd 226.5	钌	349.9	Ne 352.0		328.1	Sn 326.2
	306.8	Al 307.0	铬	357.9	Fe 358.1	钠	589.0	Mo 588.3
溴	148.9	N 149.3/149.5	钴	240.7	Co 239.3	锶	460.7	Ni 460.6
镉	228.8	Cd 226.5		240.7	Sn 242.1	碲	214.3	Zn 212.5
铯	852.1	Ne 854.5	铜	324.8	Cu 323.1		214.3	Sb 217.9
钙	422.7	Fe 421.9	镝	421.2	Fe 421.6	铊	276.8	Pb 280.1
	422.7	Fe 423.6		421.2	Ag 421.1	锡	224.6	Cd 226.5
铬	357.9	Ne 352.0	铒	400.8	Er 394.4		286.3	Sn 283.9
锂	670.8	Ne 671.7	铕	459.4	Cr 460.1	钛	364.3	Ni 362.5
镁	285.2	Cd 283.7	镓	287.4	Cd 283.7		365.4	Ni 362.5
	285.2	Sn 283.9		287.4	Sn 283.9	铀	358.4	Fe 358.1
锰	279.5	Pb 280.1	金	242.8	Sn 242.1	钒	318.4	Cu 323.1
	279.5	Cu 282.4	铟	303.9	Al 307.0		318.5	Cu 323.1
汞	253.7	Cu 249.2	碘	183.0	I 184.4	锌	213.9	Zn 212.5
钼	313.3	Mo 311.2	铁	248.3	Cu 249.2			

四、自蚀效应和背景（共振线吸收法）

该法用空心阴极灯的分析线测定原子吸收和背景吸收，用经过分析元素的原子蒸气吸收

(共振吸收）后的空心阴极灯发射线测定背景吸收。实际上用于背景吸收测量的辐射线相当于发生了严重自蚀的谱线，在共振吸收线的中心部分不发生吸收，只有在两翼可发生吸收，所以仅测定背景吸收。1978年上海冶金所刘瑶函等提出用高强度空心阴极灯发射的锐线作测量光束，用辅助电极不放电而当作一般空心阴极灯，并以强脉冲放电所发射的宽谱线作参比光束，进行背景校正，以后又采用强弱脉冲轮流触发普通空心阴极灯的方法进行背景校正。1983年国内研制成功自蚀效应火焰原子吸收分光光度计，IL公司在1983年匹兹堡会议上展出了自蚀效应原子吸收分光光度计商品仪器（Video 22型）

自蚀效应和背景的数学表示式为

$$A=\lg\frac{I_{强}}{I_{弱}}=a\cdot l\cdot n(K_{弱}-K_{强})$$

式中，$I_{强}$、$I_{弱}$ 分别为经过样品吸收后强弱脉冲谱线的强度；$K_{弱}$、$K_{强}$ 分别是原子蒸气对弱强脉冲谱线的吸收系数；n 为待测原子数；l 为吸收池长度；a 为常数（对一种元素而言）。

由于 $K_{强}$不 等于零，故其灵敏度低。平 均下降约 50%。另外对于难产生自蚀谱线的元素，不能运用此法。

五、其 他 方 法

（一）时间分辨测光法

时间分辨测光法是按时间先后顺序测定原子吸收加背景吸收信号和背景吸收信号。在空心阴极灯进行放电过程中，对灯加电压时，氖气立即开始辐射，然后才是原子的共振辐射。通过氖线测定背景吸收，用原子共振辐射线测定原子吸收和背景吸收，再用时间分辨技术将二信号分开，相减后，即获得了校正了背景吸收后的原子吸收信号。

（二）CEWM 法

CEWM 法是连续光源中阶梯光栅单色器波长调制原子吸收法的简称。波长调制就是利用对波长选择的特性，将原子吸收信号从背景中分离出来，达到背景校正的目的。美国 T. C. O'Haver 和 J. M. Harnly 等[62]在这方面做了长期系统的研究工作，Harnly 等人[63]又将 CEWE-AA 发展成快速单道扫描原子吸收光谱仪器，简称 SIMAAC（即连续光源多元素同时测定原子吸收分光光度计）。

六、背景校正能力的测试

正确评价某种背景校正方法或某种原子吸收光谱仪器背景校正器效果的最好方法，是对背景校正能力的实验测试。

测试方法分静态测试和动态测试两种方式。静态测试方法操作简便快速；动态测试方法是在仪器工作程序的原子化过程中进行实际测试，操作比较复杂，但能得到仪器背景校正能力较确切的信息。

静态测试方法是将一特制的具有一定透过率的金属网（要求网孔大小分布均匀），或中性滤光片插入原子化器部分（放的位置尽量不要在光路的成象点上，并应与光束保持垂直）进行测试。如仪器在插入之前已调试好，吸光度值为0，插入后仍然指示0，表示能完全校正背景。如插入的中性滤光片（或金属网）的吸光度值为1，表示能完全校正吸光度为1的静态背景，余类推。静态测试用的中性滤光片（或金属网）是静止的，在空间上是均匀分布的。与前述背景信号在原子化过程中，在原子化器空间具有随时间、空间而变化的特征相比，静态

测试的结果不够准确。在仪器调试过程中，此法可用于判定光路是否调整好，空心阴极灯和氘灯的光束是否调整到严格重合。在光路系统完好的条件下，还可用以判定电路系统的背景校正能力。

动态测试是比较有效的背景校正判定方法。通常都是用光谱纯或优级纯的氯化钠，配制成一定浓度的溶液，作为样品，在实际原子化过程中测定背景校正能力。因 NaCl 分子在紫外区有强的吸收光谱带，原子化过程中的氯化钠微粒还产生散射，同时这种试剂比较容易获得（见表 7-4）。

表 7-4　背景校正测试的原子化条件

原子化条件	干燥	灰化	原子化
θ/℃	100	300	2450
t/s	20	30	4

表 7-5 对各种背景校正方法进行了比较。

表 7-5　各种背景校正方法比较表[1]

背景校正法		连续光源法（氘灯）	塞曼法	自吸收法（S-H）	CEWM 法
仪表仪器		P-E5000 型	日立 Z6000/7000/8000 型 P-EZ3030 型	IL Video22 型	无商品仪器
基本原理		用 HCl 光束测量 AA+BG、D_2 灯光束测量 BG，二者之差为校正 BG 后的 AA	利用塞曼调制（偏振调制和磁场调制）中 I_π（P_H 或 $I_{H=0}$）光束测量 AA+BG，用 I_σ（P_L 或 I_H）测量 BG+部分 AA，二者之差为校正了 BG 的 AA	利用强、弱光脉冲进行调制，用弱脉冲光束测量 AA+BG，用强脉冲测量 BG、部分 AA，二者之差为校正了 BG 的 AA	—
性能	波长一致性	背景吸收为单色器光谱通带范围内平均值	磁场加于原子化器上，背景吸收为分析线波长处的信号	背景吸收为分析线波长两侧的吸收信号	在分析线波长加部分邻近两侧测量背景吸收
	光源的限制	光源为 HCL，D_2 灯（或卤素灯）	普通 HCL，在磁场加于光源上时，要求用特种灯	普通 HCL	氙弧灯（短弧氙灯）
	单色器	低分辨率单色器	低分辨率单色器	低分辨率单色器	高分辨率单色器（或中阶梯光栅单色器）
	光束平衡	因用了两个不同的光源而产生了光学平衡及准光问题	无光束平衡问题	由于在有自吸和无自吸时 HCL 中的发光部位不同而产生准光偏差	无光束平衡问题
	光能量	由于光束组合中的能量损失，噪声提高了 40%	光路中使用偏光元件，使光能损失在 50%以上，且因波长不同，损失大小也不同	无光能损失	由于使用连续光源光能较低
	漂移	如果采用单光束基线，漂移增加	是理想的双光束仪器，基线稳定性好	由于自吸作用不稳定，基线较差	
	分析灵敏度	无损失	反常塞曼分裂谱线分析灵敏度有损失，因元素而异；磁场调制方式的分析灵敏度与普通原子吸收法相近	灵敏度损失约10%～70%，对某些元素更大，如 Ba 等	由于使用连续光源，检出限差，在波长 250nm 以下比普通 AAS 差 4 倍，在 250nm 以上差 2 倍
	对原子化器的限制	无任何限制	对于磁场加于光源上的仪器无限制，磁场加于原子化器上的仪器，原子化器要受磁场结构的限制	无任何限制	无任何限制
	工作曲线线性范围	同于普通 AAS 法	偏振调制方式（如 Z6000/7000/8000 型）差于普通 AAS 法；磁场调制方式（如 Z3030 型）接近普通 AAS 法	差于普通 AAS 法	上限与普通 AAS 法相同，测定下限因检出变坏线性范围较普通 AAS 法小些
	背景校正性能	仅对连续背景校正效果好	背景校正性能好	背景校正性能好	背景校正性能好
	背景校正精度	差 5%～10%	好，～1%	好	好
	光谱干扰	光谱干扰增加	D_2 灯背景校正的光谱干扰不存在，并能校正一些光谱重叠干扰	D_2 灯背景校正的光谱干扰不存在，并能校正一些光谱重叠干扰	
	造价	低	略高于 D_2 灯背景校正仪器	低	高

续表

背景校正法		连续光源法（氘灯）	塞曼法	自吸收法（S-H）	CEWM 法
性能	多元素同时分析可能性	—	—	—	可能用于多元素同时测定
	分析线	大部分用共振线同于普通 AAS	根据分裂情况的不同，在考虑信噪比及校正曲线的线性范围时，可考虑使用不同普通 AAS 的非共振线如： AA　ZAA Cr 357.9nm　359.3nm Co 240.7nm　241.2nm Mn 279.5nm　277.8nm	—	对分析线在低于 250nm 区时可选择长波区的分析线，这样光谱辐射增强，改善检出限和校正曲线的线性，如： AA　CEWM S/N 改善倍数： Ni (232.0nm 252.5nm) 6； Sn (224.6nm 286.3nm) 3.5； Pd (244.8nm 340.5nm) 1.5
其他		—	背景有塞曼分裂时情况复杂化，产生误差以致不能校正	普通 HCL 工作寿命会有影响表现在实际分析中技术指标下降等。	—

① 表中 AA 为原子吸收信号；BG 为背景吸收信号。

第三节　基体改进技术[64]

所谓基体改进技术，在 70 年代主要是指在待测样品溶液中加入某种化学试剂，使基体成分转变为较易挥发的化合物，或将待测元素转变为更加稳定的化合物，以便允许较高的灰化温度和在灰化阶段能更有效地除去干扰基体的一种方法。目前人们将无机化合物和有机化合物基体改进剂的应用，石墨管焦化和金属碳化物涂层以及在惰性气体中加入某些活性气体等技术统称为基体改进技术，这里讨论的不包括石墨管的改进技术。

一、基体改进剂的类型

基体改进剂可分为无机化合物基体改进剂、有机化合物基体改进剂和活性气体改进剂 3 种类型。

（一）无机化合物基体改进剂

许多铵盐、无机酸、金属氧化物和金属盐类已作为有效的基体改进剂用于石墨炉原子吸收分析。主要的无机化合物基体改进剂有硝酸铵、硫酸铵、焦硫酸铵、磷酸铵、磷酸二氢铵、硫化铵、硝酸、高氯酸、磷酸、盐酸、过氧化氢、硫化钠、硫氰化钾、过氧化钠、重铬酸钾、高锰酸钾、硝酸锂、镍、铂、钯、镧、铜、铁、钼、铑、银和钙等。

（二）有机化合物基体改进剂

有机化合物基体改进剂主要有抗坏血酸、EDTA、硫脲、草酸、蔗糖、酒石酸、柠檬酸、乳酸、组氨酸、丁氨二酸、乙酸铵等有机试剂。

（三）活性气体改进剂

在灰化过程或原子化过程中将活性气体引入屏蔽气流中，主要的活性气体有氧气和氢气。

二、基体改进的机理

基体改进主要通过以下途径降低干扰：

①使基体形成易挥发的化合物以降低背景吸收。

②使基体形成难解离的化合物，避免分析元素形成易挥发难解离的一卤化物，降低灰化损失和气相干扰。

③使分析元素形成较易解离的化合物，避免形成热稳定碳化物，降低凝相干扰。

④使分析元素形成热稳定化合物，降低分析元素的挥发性，防止灰化损失。

⑤形成热稳定的合金，降低分析元素的挥发性防止灰化损失。

⑥形成强还原性环境改善原子化过程。

⑦改善基体的物理特性，防止分析元素被基体包藏，降低凝相干扰和气相干扰。

有关基体改进剂的应用请参阅有关文献[65，66]。表 7-6 给出了各种分析元素常用的基体改进剂。

表 7-6 分析元素与基体改进剂

分析元素	基体改进剂	分析元素	基体改进剂	分析元素	基体改进剂	分析元素	基体改进剂
铝	硝酸镁	镉	组氨酸	锗	硝 酸	汞	盐酸＋过氧化氢
	Triton X-100		乳 酸		氢氧化钠		柠檬酸
	氢氧化铵		硝 酸	金	Triton X 100＋Ni	磷	镧
	硫酸铵		硝酸铵		硝酸铵	硒	硝酸铵
锑	镧		硫酸铵	铟	O_2		镍
	镍		磷酸二氢铵	铁	硝酸铵		铜
	铂，钯		硫化铵	铅	硝酸铵		钼
	H_2		磷酸铵		磷酸二氢铵		铑
砷	镍		氟化铵		磷 酸		高锰酸钾，重铬酸钾
	镁		铂		镧	硅	钙
	钯	钙	硝 酸		铂，钯，金	银	EDTA
铍	铝，钙	铬	磷酸二氢铵		抗坏血酸	碲	镍
	硝酸镁	钴	抗坏血酸		EDTA		铂，钯
铋	镍	铜	抗坏血酸		硫 脲	铊	硝 酸
	EDTA，O_2		EDTA		草 酸		酒石酸＋硫酸
	钯		硫酸铵	锂	硫酸，磷酸	锡	抗坏血酸
	镍		磷酸铵	锰	硝酸铵	钒	钙、镁
硼	钙，钡		硝酸铵		EDTA	锌	硝酸铵
	钙＋镁		蔗 糖		硫 脲		EDTA
镉	焦硫酸铵		硫 脲	汞	银		柠檬酸
	镧		过氧化钠		钯		
	EDTA		磷 酸	汞	硫化铵		
	柠檬酸	镓	抗坏血酸		硫化钠		

第四节　石墨管改进技术

一、几种常用的石墨管改进方法

普通石墨制作的石墨管存在不少缺点，为弥补之不足，曾试验过改善管的表面性质的各种方法，这些方法通称为石墨管改进技术。

（一）热解石墨涂覆处理法[67～69]

1966 年 Львов 首先提出这种方法，后许多人作了改进。该方法一般在 10%甲烷-90%氩气的混合气体流的气氛中（流速一般在 300ml·min^{-1}以下），将石墨管加热到（2000～2400)℃，此时甲烷热解产生的石墨沉积于石墨管表面上，可以形成均匀致密而且厚度适宜的具有光泽的热解石墨涂层。总的加热处理时间以及温度时间程序的设计，需根据具体装置的结构和功能，基本参数而定。

（二）难熔碳化物涂层

目前使用的碳化物涂层石墨管常见的有镧、锆、钒、钡、钼、硼、钽、硅、钛、钨等的碳化物。刘纪琳等评述了难熔碳化物涂层的方法[70]。例如钽涂层石墨管的制备为[71]：石墨管经 100℃干燥 1h，在浓度为 6%TaF_4 溶液中减压浸渍 30min 或超声浸渍 10min，按下列程序升

温处理：灰化 1000℃，30s；原子化 2500℃，5s。重复处理一次。锆涂层石墨管的制备是[72]：石墨管在 100℃下干燥 1h，浸入以硝酸氧锆形式存在的锆溶液中 24h，取出于 100℃下干燥 1h。然后再按下列升温程序处理：灰化 500℃，30s；原子化 2700℃。60s，并重复一次。镧涂层管的制备方法是[73]注入 $LaCl_3$ 溶液(每 100ml 水 0.180g$LaCl_3$)100μl 于石墨管内，按下列程序升温处理：干燥 100℃，100s；灰化 1000℃，30s；原子化 2800℃，10s。重复处理两次。

（三）在石墨管内层表面衬某些金属片

以衬钽管为例说明它的制备[74]：石墨管长 28mm，内径 6.2mm，将 0.1mm 厚金属钽片切割成长 19mm，宽 15mm 的小片，在一端距边 2mm 的中央处钻一直径 2mm 的小孔，借助于比石墨管内径稍小的圆铁棒，将钽片卷成一圆筒，然后将铁棒与钽筒一起放人稍大于石墨管内径的玻璃管中，用力滚压铁棒与玻璃管，直到钽筒匀滑、圆称为止，然后取出钽筒仔细地套入上述石墨管中，小孔与石墨管上加样小孔对准，当石墨管受热时金属钽片膨胀，使钽片与石墨管内壁紧密接触。常用的还有衬钨管。

我国马怡载等从 1981 年开始就提出了一种文献上未有过的钨钽石墨管（WTaPGT）[75]，从 1986 年开始又提出一种性能更好的钨石墨管（WPGT）[76]。一种新的石墨表面改进方法[77]是用聚乙烯的苯溶液对石墨探针或石墨管进行涂层处理。

二、石墨管改进技术的效果

表 7-7 给出各种改性石墨管的在测定各种元素时的使用效果。

表 7-7　改性石墨管用于石墨炉原子吸收的效果

测定的元素	石墨炉型号及处理方法	效　果　及　收　益
Ba，Ca，Sr，La，Pr，Sm，Eu，Gd，Tb，Ho，Er，Y，Yb	HGA-2000 型，普通升温原子化加热方式 热解涂层管	13 种元素的测定灵敏度显著提高，增感系数分别为 2.5(Gd)～6.2(Sr)，可稳定使用 100 次，继续使用时，Ba、Sr 的吸光度信号降到最初信号的 85%及 90%；每 10 次测定的相对标准偏差为 2.5%～4.2%；用 5 个热解涂层管测定 Ba，得到的平均增感系数为 5.0，变异系数 8.3%
La，Ce，Pr，Nd，Sm，Eu，Gd，Tb，Dy，Ho，Er，Tm，Yb，Lu	HGA-74 型和 HGA-76 型，普通升温原子化加热方式 热解涂层管	稀土元素灵敏度显著提高，增感系数达到 18(La)～3(Yb)，检出限亦有大致相同倍数的改善；如采用原子化阶段中间停气方式，还可以进一步改善，Sm—1.4；Eu—1.5；Tm—1.4，Yb—1.6。使用寿命达 100 次，100 次以后灵敏度开始降低，精密度变坏
Ni，Fe，Bi，Be，Mo，Ti，V，Mn，Cu，Pb 以及 La，Ce，Pr，Nd，Sm，Eu，Gd，Tb，Ho，Dy，Er，Tm，Yb，Lu	Y_3 型石墨炉，普通升温原子化加热方式 热解涂层管	稀土元素灵敏度提高最显著，增感系数达到 20(Pr)～5(Nd)，平均增感系数大约为 10，对于原子化温度高的元素如 Mo，Ti，V，Be 灵敏度提高较大，增感系数分别为 V，Mo—5.0；Be—2.2；Ti—3.0 对于原子化温度低或原子化快的元素如 Cu，Pb，Mn，增感系数接近 2.0，Ni—1.8，Fe—1.0，Bi—1.7，灵敏度提高不多或没有什么改善。测定 Mo 时，相对标准偏差一般在 2%～3%，新的热解涂层管使用 1～2 次，吸光度信号就达到稳定，可保持使用数百次，甚至近千次
V	HFA 型无火焰原子化器 热解涂层管	灵敏度提高到（10～20）倍。热解涂层管再经过碳化钨处理又可提高到 1.5 倍。用于河水中痕量钒的共沉淀-原子吸收测定，检出限平均 1.5μg·L^{-1}，测定下限 4.5μg·L^{-1}
V	HGA-500 型，最大功率升温原子化加热方式 热解涂层管	用自制原位热解涂层管，钒的灵敏度增感系数为 4～5，使用（5～6）次信号达到稳定，直至 120 次以前信号基本稳定。相对标准偏差不超过 2%。130 次以后信号降低较快，精密度变坏。使用寿命为 120～130 次，用于大气飘尘、工业纯硅中钒的测定
Be，Ba，V，Al，As，Cd，Co，Cr，Cu，Mn，Se，Mo，Ni，Pb，Sb	HGA-74 型，普通升温原子化加热方式 热解涂层管	Be(50μl)、Ba 和 V(10μl)的检出限（2σ）分别达到 0.01，1.0 和 1.0μg·ml^{-1}，没有记忆效应。使用寿命（200～400）次，大约延长 1 倍；Al、As、Cd、Co、Cr 等其他 12 种元素的增感系数为 1.8(Mn)～3.3(Mo)
Pb，Mn，Cu，Ni，Mo，V，Ti，B，Rh	HGA-2200 型，原子化阶段停气，普通升温原子化加热方式 热解涂层管	对容易原子化或原子化快的元素 Pb、Mn，峰值和峰面积积分测定灵敏度有改善，增感系数为 1.3～1.7；对原子化温度高的元素 Mo、V、Ti，峰值测定灵敏度的增感系数分别为 5.0，5.7 和 3.8；峰面积积分测定灵敏度增感系数分别为 2.5，2.7 和 3.7，灵敏度有显著提高；得到了 Rh 和 B 的吸收信号，绝对灵敏度（特征量）分别为 1ng 和 17ng（25μl），但是硼有记忆效应；在高温 2750℃～2850℃下使用寿命达到 100 次以上，延长约 1 倍。空烧（3～4）次达到信号稳定。第（110～125）次测定 2.5ngV 的相对标准偏差为 2.1%

续表

测定的元素	石墨炉型号及处理方法	效 果 及 收 益
Se	HGA-500 型，最大功率升温原子化加热方式，原子化阶段降低内氩气流量 热解涂层管	峰值测定灵敏度提高近 1 倍。用于石墨炉原子吸收光谱测定营养补剂中痕量硒，精密度达 5%，优于氢化物发生-原子吸收法的精密度 8%，使用 P-E 5000 型原子吸收分光光度计
Pt、Pd、Rh、Ru、Ir	HGA-500 型，最大功率升温原子化加热方式 热解涂层管	铂族元素的灵敏度增感系数达到 1.9(Pt)～3.4(Rh,Ru)；脉冲吸收峰显著变窄变高，基本上消除了记忆效应；可以选择更低的最佳原子化温度；使用寿命一般为 100 次左右，继续使用则灵敏度降低，至 150 次左右再现性明显变坏，再次再生处理寿命可延长约 50 次
Ni	HGA-500 型，最大功率升温原子化加热方式 热解涂层管	原子化阶段降低内氩气流速；用热解涂层管镍的灵敏度提高到 2.5 倍；用于血清中镍的石墨炉原子吸收测定
Ba、V、Ti、Zr、Co、Cr、Mn、Ni、Sr	HGA-70 型，普通升温原子化加热方式 热解涂层管	在原子化阶段内氩气流含有 1%甲烷，连续热解处理，Ba、V、Ti、Zr 的增感系数分别为：Ba—2.5，V—4.5，Ti—1.6，Zr—3.0，而 Co—1.6，Cr—1.4，Mn—1.6，Ni—1.4，Sr—1.5
Be、Cr、Mn、Al	HGA-70 型 涂层法：镧、锆、钒、钡、钼、硼等的碳化物	灵敏度显著提高，以镧、锆等 6 种元素的碳化物涂覆处理石墨管，测定 Be 的增感系数在 2.2～12.8 范围内。碳化锆涂覆管使 Be 的灵敏度提高 10 倍以上，检出限也有 10 倍以上的改善。涂层法处理的最佳用量为：La、B 各 600μg，Zr3000μg。以 600μg La 和 600μg Zr 顺序或同时处理，Be 的灵敏度提高最大。寿命为 150 次以上，而且增感效应稳定。校准曲线(Be)线性改善。通过原点，测定 1ng Be、Mn 的相对标准偏差(*RSD*)平均为 6.6%
Sn	HGA-70、74 或 76 型涂层法：碳化钽	灵敏度提高近 1 倍，精密度、准确度有显著改善。已用于食品中锡的石墨炉原子吸收测定。检出限达到 0.01mg·g⁻¹干样
Ba、Be、V、Mo、Co、Ni、Cu、Cr	HGA-74 型 涂层法：碳化镧	La 的最佳用量 400μg。热解涂层管经碳化镧涂覆处理后，增感系数分别为：Be—6.0；Ba、V、Al—2.0；Co—4.5；Mo—5；Ni—4.0；Cu、Cr—3；Be、Ba、V 的检出限分别达到 0.01、0.1、1.0μg·ml⁻¹。已用于水中 Be、Ba、V 及其他元素的石墨炉原子吸收测定。处理管寿命可达到(200～400)次测定
As	HGA-72 型 涂层法：碳化锆	锆的最佳用量(60～100)μg，As 的吸收信号提高最大。如同时采用原子化阶段停气方式，灵敏度提高近 10 倍，特征浓度为 1.3ng·ml⁻¹(1%吸收)(样品加入量 50μl) 100μg·L⁻¹ As 的相对标准偏差为 1.5%(*n*=10)，用于高纯氧化锗中微量砷的石墨炉原子吸收测定
As	HGA-2200 型 涂层法：碳化钽	灰化温度低于 800℃，不添加 Ni²⁺，As 也不损失，峰值灵敏度提高到 4 倍左右。对 20μl0.25μg·ml⁻¹As 的测定，相对标准偏差为 4.2%(*n*=10)，绝对检出限达 0.1ng As，管的寿命达 200 次，用于岩石中砷的石墨炉原子吸收测定
Ga	HGA 2000 型 浸渍处理法：碳化锆	峰值灵敏度提高约 5 倍，而且脉冲吸收峰的形状改善，趋于对称，检出限(2σ)为 0.015ng，重复 10 次测定 0.1ngGa，相对标准偏差为 2.5%，在 2500℃，加热 30s 的条件下，可使用 500 次，比普通石墨管增加约 1 倍，检出限改善近 10 倍，Al、B、Ba 等 22 种共存元素的干扰显著降低。已用于金属铟、铝及其合金中微量 Ga 的测定
Pb	HGA-2200 型 浸渍处理法：碳化锆	用于有机铅化合物的分析。在加入过量碘作为添加剂时，有机铅化合物中 Pb 的灵敏度显著改善，增感系数 2.0～3.5，超过通用热解涂层管
Sn	HGA-2200 型和日立 170-70 型仪器的石墨炉 浸渍处理法：V、Mo、Zr 的碳化物	用于有机锡化合物的分析，各种有机锡化合物中 Sn 的吸收信号最大可提高约 30 倍。以碳化锆涂覆处理管的效果最好，平均吸光度值为 0.057，对应的相对标准偏差为 4.9%，而未处理管对应的相对标准偏差为 20%左右。日立杯型石墨管经过处理后，使用寿命至少为 180 次，加样量为 10μl
Al、B、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、La、Mg、Mn、Ni、Pb、Sc、Sn、Ti、Zn	SAS704 型(日本第二精工舍)和 FLA、100 型(日本 Jarrell-Ash) 浸渍处理法：碳化钽	对于原子化温度低的 Sn 和 Cd，灵敏度和精密度有显著改善，B 的灵敏度提高到 5.5 倍，但重现性很差。其他元素灵敏度改善不大。Ti 灵敏的度反而降低。用 9 只处理管测定 0.5ngSn，其响应的相对标准偏差为 8.1%。在 2700℃测定 Ni，寿命达 280 次，增加近 1 倍，在使用寿命期内，响应信号稳定，精密度好。管表面的光泽，硬度没有改变。没形成细微的碳粒
P	HGA-71 型 浸渍处理法：碳化硅及碳化钛	用于石墨炉蒸发-火焰分子发射光谱测定磷，钙和其他元素对 POH 的发射的抑制效应明显降低。发射强度提高到(0.5～2)倍，寿命延长不多，测定 1mg·L⁻¹磷时，相对标准偏差为 3%～6%(*n*=5)。Ca 共存量(10～100)mg·L⁻¹时，1mg·L⁻¹磷的信号变化不大于 10%，检出限为 1ng，校准曲线基本上是线性的
Bi、As、Co、Mn、Pb、Sb、Sn、Te、Al、Cd、Se、Zn、Ag	HGA-74 型浸渍处理法：碳化钽	2700℃原子化时，可使用(350～400)次，已使用 300 次和 350 次的处理管，用于测定稀土-铁基体中 1.5ng Pb 和 3ng Sn，人工加样，相对标准偏差分别达到 1.3%和 2.2%。测定铂族元素时，反而产生抑制效应。已用于金属镍和铜的标准样品中多种杂质元素的测定

续表

测定的元素	石墨炉型号及处理方法	效果及收益
Cd	GA-2 型 浸渍处理法：碳化钽，碳化钨	用于尿中镉的测定，分析特性有所改善。使无机盐类对 Cd 的干扰降低。0.36μg·L^{-1}Cd 测定时相对标准偏差为 1.76%，如空白降低，可测定尿中低于 0.1μg·L^{-1}的 Cd
Se	日立 170-70 型仪器的石墨炉 浸渍处理法：碳化锆和碳化钽	碳化锆涂覆管使 Se 的响应信号提高最大，如再经过热解处理，响应信号又提高大约 20%，测定精密度亦有所改善。不再需要加入基体改善剂 Ni^{2+}或 La^{3+}，Se 的出现温度不受影响
Si	CRA-90 型 阴极溅射-高温处理法：碳化钽	测定灵敏度提高大约 3 倍，检出限达到 3ng，其他若干元素的灵敏度也有所改善，使用寿命达 300 次，增感效应一直保持稳定，处理的重现性亦好。已用于水中低含量 Si 的测定
Cu、Pb	HGA-2200 型阴极溅射-高温处理法：碳化钨、碳化钽	测定 1%HNO_3 中 Cu，可使用 3000 次以上，信号稳定。$HClO_4$ 存在下，Cu 的灵敏度降低不到 10%，重现性亦令人满意。用于 NaCl 中 Pb 的测定，可使用 1000 次以上，涂层未受影响，不形成飞溅的碳粒产生干扰。测定 NaCl 中 Pb 时相对标准偏差分别为：碳化钨处理管 1.3%～2.5%；普通石墨管 0.8%～1.7%；市售热解涂层管 1.4%～11.0%。处理后管的抗氧化和抗化学侵蚀能力显著增强，寿命大大延长

第五节　平台原子化技术

1977 年 L'vov 等人提出了一种使吸收脉冲向石墨炉最终平衡温度区移动的通用方法，即所谓 L'vov 平台原子化技术[78]，该技术把一块具有一定形状和大小用各向异性热解石墨或各向同性普通石墨制成的石墨薄板，放入石墨炉中正对石墨管加样孔下方的位置，这种石墨薄板就叫做石墨平台或 L'vov 平台。平台原子化法的一般操作是将几微升至几十微升体积的样品溶液加至平台上，除了适当延长干燥时间和适当提高干燥温度或省略灰化阶段外，按照常规的加热程序加热石墨炉，并用相同方法记录和测量原子化阶段待测元素的瞬时吸收脉冲信号。

平台的作用是创造一个原子化时能满足时间和空间要求的等温条件，以提高灵敏度和消除干扰。因为平台与管壁的接触是点接触，加热平台主要靠来自管壁的辐射，而管壁的辐射功率与温度有关。在原子化阶段加热开始时，平台的加热相对于管壁加热在时间上出现延迟，由于这种原因，平台原子化时待测元素的吸收脉冲也出现时间延迟，使其吸收脉冲位置移向

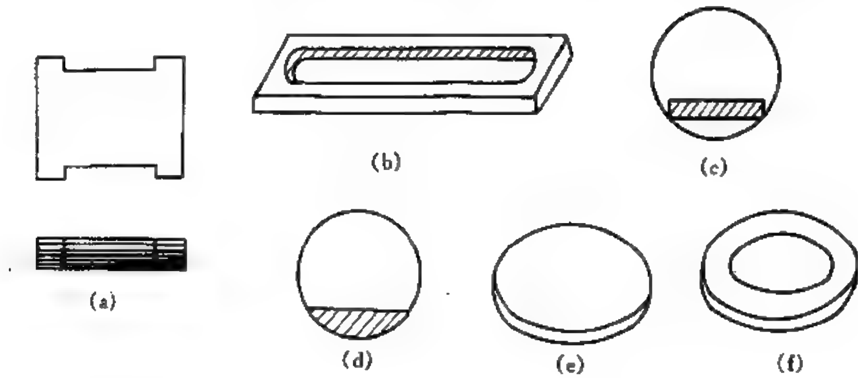


图 7-1　几种石墨平台的形状和尺寸

(a) 5×4×1mm；(b) 带凹槽的长方形平台，15mm×4mm×1mm，凹槽为 13mm×2mm×0.5mm；(c) 长方形平板平台及其在管内的位置，15mm×5mm，0.84g；(d) 半圆柱形平台及其在管内的位置；(e) 圆形平板平台，直径 4mm，厚 (0.25～2.0) mm；(f) 带凹槽（边缘）的圆形平台，直径 4mm，厚 1.25mm，凹槽深度 1mm

(a)、(b)、(c)、(d)—热解石墨；(e)、(f)—普通石墨

炉的温度平衡区。另外，待测元素被蒸发至温度比样品本身的温度更高的惰性气体中，有利于待测元素的原子化和降低伴生组分的干扰。

就加热速率而言，只要平台形状，尺寸、质量选择适当，平台加热速率比石墨管更高，因此待测元素的原子化时间更短，而原子在炉内停留时间变化不大，两者之比更小，当≪1 时，吸收脉冲峰信号最大，直接正比于待测元素的总原子数。根据以上分析，在一定条件下，相对于常规管壁蒸发原子化方式来说，可改善某些元素的测定灵敏度，并且有利于降低或消除基体组分的影响。

此外，平台原子化技术可以用于固体样品的分析，改善分析精度，延长石墨管的使用寿命。

平台形状、尺寸及质量的选择根据所用管状石墨炉的具体情况而定，而以吸收脉冲延迟最大，峰高或峰面积积分信号最大为判据。为了保证热量从管壁向平台的传导最小，平台与管壁的接触点不多于 3～4 个。平台质量增加，吸收脉冲的时间延迟越大，但原子化时间也延长，会导致吸收脉冲峰高降低，必须权衡。一般公认热解石墨是制作平台的最佳材料，图 7-1 为已报道过的几种石墨平台的形状，尺寸及材料。

第六节　探针原子化技术

为力求实现准等温或等温原子化，从原子化方法的实质来看，L'vov 及其同事在 1978 年提出的用于石墨炉原子吸收光谱法的探针原子化技术是主要方法之一[79,80]。所谓石墨炉原子吸收法的探针原子化技术就是将数微升至数十微升试样溶液加在一根难熔金属丝探针或石墨探针头上，利用红外幅射加热使试样液滴蒸干，然后将探针前端连同试样干渣一起插入已预先加热到恒定温度的石墨炉中，从而使试样蒸发并原子化，同时记录相应的原子吸收信号。

探针原子化技术应用于实际样品测定的优点是：与常规管壁取样或平台原子化相比，对某些元素的测定灵敏度和检测限有较显著改善；显著降低了基体效应和化学干扰对测定结果的影响；与石墨管改进技术相结合，能实现某些元素测定的最佳化；提供了多元素同时测定的潜在可能性。

对探针技术的基本性能及其影响因素的研究表明：

①探针法的样品有效加热速度远高于一般采用的快速加热可达到的升温速度，在石墨炉温度（2300℃）时，探针插入 0.3s 后即达 2000℃，随探针厚度不同达到稳态蒸气温度的时间亦不同，约 300ms～900ms，在相同的管壁温度下平台法所得有效蒸气温度比探针法高。

②不同元素的探针原子化法得到的峰值吸收和积分吸收随温度的变化是不同的，在(1500～3000)℃范围内，挥发性元素（Cd，Pb，Zn）其峰面积灵敏度降低了 2 倍，而峰值吸收几乎不变；中等挥发性元素（Cu，Fe，Mn）存在一定温度范围，超过这范围，峰面积吸收大致不变，而峰高吸收始终随温度升高而升高；难挥发元素（Mo，V，Cr）峰高吸收始终随温度上升而增加，峰面积吸收开始随温度升高而增加，达一定温度后，趋于不变。这些现象可用原子产生速度和扩散损失速度平衡理论解释。

③探针原子化技术由于实现了恒温原子化，吸收峰形得到改善。

④炉管和探针材料对灵敏度和峰形有一定影响。

探针-石墨炉原子化技术可用作原子化机理和干扰机理的研究。我国学者邓勃等对用探针原子化法系统地研究了原子化机理，所研究的元素或化合物有 Fe、Cr、Mn、V、Sn、$Sr(NO_3)_2$、Co、Mo、Ge、$SbCl_3$、Ge、Sm、$Eu(NO_3)_3$、$La(NO_3)_3$、Au 等。

在作干扰机理研究中，由于用探针技术进样，可将分析元素与干扰元素分开进样。如同时适当控制实验条件，使它们同时气化进入气相或先后进入气相，有利于观察干扰现象。

早期探针装置，都是将滴加有样品的探针夹在仪器原有的石墨炉自动加样器的夹头上，或固定在与光学导轨底座相连的固体取样器上，然后用手移动自动加样器，将探针插入已恒温到原子化温度的石墨炉中，见图 7-2。手动进样重现性较差，影响准确度和精密度。探针装置自动化的研究取得了很大进展，各种探针自动运动装置相继问世。我国侯书恩等研制成功了 APA-1 型自动探针原子化器，与自动进样器配合，实现了从加样到打印分析结果的探针原子化全自动分析。

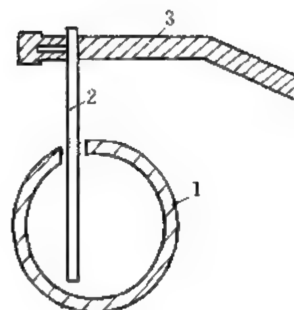


图 7-2　探针插入 HGA-76 型石墨炉的示意图
1—石墨炉；2—探针；3—AS-1 型自动进样器的活动加样臂

第七节　流动注射（FIA）与原子吸收法联用技术

FIA 与原子吸收分光光度法联用技术已得到广泛的应用，该技术在保持精密度的前提下，大大提高了分析速度。通过对流动注射系统分散度的控制和连续富集可改变其分析灵敏度，使用 FIA 合并带法使释放剂、缓冲剂等的填加实现自动化，并减少了用量。由于进样与载流的洗涤过程交替进行，避免了因试样盐分浓度过高而堵塞雾化器，从而可减小稀释样品造成的灵敏度的损失。以上种种的优点，使 FIA 与 AAS 的结合成为重要的研究方向。我国学者方肇伦对 FIA 在 AAS 中的应用进行了多次的综述[81,82]，详细介绍了 FIA 采样法、稀释法、合并带法、校正技术、予浓缩技术、FIA 氢化物发生原子吸收法和 FIA 冷蒸气原子吸收测汞法与火焰原子吸收接口等。由方肇伦撰写的《流动注射原子吸收光谱法（FIAAS）》（英文版）[83]于 1995 年在英国出版发行。该书对仪器装置及其在 FAAS、GFAAS、氢化物发生 AAS 中的应用、稀释、增强灵敏度，在线富集、校正方法等各种技术作了系统详细的论述。这是一本具有较高学术水平和应用价值的专著。在 J. RŮŽIČKA 等著的《流动注射分析》[84]一书中列出了 FIA 与 AAS 联用技术的应用文献 123 篇，可供参考。近 10 年我国 FIA 与 AAS 联用技术的部分应用文献，可参看《分析试验室》有关流动注射分析技术的评述[85~88]。

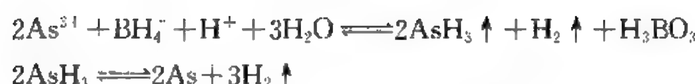
第八节　氢化物发生原子吸收分析技术

As、Sn、Bi、Ge、Sn、Pb、Se 和 Te 等 8 种元素，用火焰原子吸收法测定灵敏度低，目前通常采用氢化物气相热解原子化法[39]，即利用这些元素在强还原作用下生成不稳定的共价氢化物，然后将其引入加热的吸收管中热解原子化，进行原子吸收测定。该法已能测定低至 ng/ml 级的浓度，广泛应用于各领域。

一、反应原理和常用还原剂

上述 8 种元素易生成共价氢化物，其熔点和沸点如表 7-8 所示。

它们的热稳定性差，在 (500～1000)℃和惰性气氛中易分解为基态原子。以 As 为例，其反应过程如下：



$$2As^{3+}+BH_4^-+H^++3H_2O \rightleftharpoons 2AsH_3\uparrow+H_2\uparrow+H_3BO_3$$

$$2AsH_3 \rightleftharpoons 2As+3H_2\uparrow$$

表 7-8　氢化物的熔点和沸点

元素	化合物	熔点/℃	沸点/℃	元素	化合物	熔点/℃	沸点/℃
Ge	GeH_4	−160	−90	Sb	SbH_3	−88	−18
Sn	SnH_4	−150	−52	Bi	BiH_3	?	16.8
Pb	PbH_4	?	?	Se	H_2Se	−65	−41.3
As	AsH_3	−116	−62	Te	H_2Te	−48	−1.8

最早使用的还原剂是 Zn-HCl、Zn-Mg-HCl 体系，因反应速度慢，已很少采用。目前使用最普遍的还原剂是 $NaBH_4$ 或 KBH_4，$NaBH_4$ 在酸性水溶液中水解，生成原子态 H^0，



$$NaBH_4+3H_2O+3HCl \longrightarrow H_3BO_3+NaCl+8H^0$$

通常是制成碱性溶液或与无机盐混合压成片剂使用。

关于铅的氢化物发生提出了 Ce^{4+}-$C_2O_4^{2-}$[89,90]及亚硝基-R 盐[91]两个新的体系。前一体系灵敏度高于其他体系且较少干扰。有人发现四乙基硼酸钠可以在微酸性介质中与 Cd 生成气态化合物，检出限为 $1ng \cdot ml^{-1}$[92]。Wickstroem[93]提出了碱性溶液中发生氢化物的方法，国内也有关于碱性氢化模式的报道。采用该法使铟的发生效率明显提高[94]。郭小伟[95]等首次报道了利用碱性溶液中发生氢化物的方法来进行不同价态的可形成氢化物元素含量的测定研究。

关于非水介质中的氢化物发生，除用二甲基甲酰胺[96]外二甲基亚砜及甲酰胺[97]均可用为 $NaBH_4$ 的溶剂。

二、氢化物发生装置

氢化物发生装置分为两部分，即氢化物发生器和原子化器。

1. 发生器

图 7-3 是岛津 AA-610S 定砷器附件经改进后的氢化物发生系统。

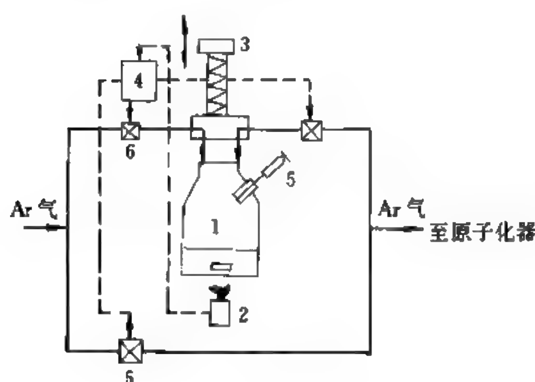


图 7-3　氢化物发生系统

1—反应器；2—电磁搅拌器；3—手把；4—计时器；5—注射器；6—电磁阀门

国内使用的氢化物发生装置大多是实验室自制的。吴廷照等设计了“小型氢化物发生器”[98]，利用雾化器的负压制作氢化物发生器[99,100]。郭小伟等设计了“双毛细管喷雾器”[101]，以类似原理设计的喷流型发生器[102]，用于少量溶液测定的微型氢化物发生器等[103]。

2. 原子化器

原子化的方法一般采用火焰或加热石英管两类。火焰一般用 Ar-H_2 或 H_2-O_2 火焰。加热石英管可采用“T”型石英管作原子化器，石英管置于空气-乙炔火焰上（见图 7-4），也可在石英管上绕电阻丝通电加热。

有人设计了用于氢化物原子吸收的缝式石英管原子化器[104]。长缝石英管原子化器用于 Sn 的测定证实其具有气相干扰少的优点[105]。

氢化物发生-石墨炉原位富集 GFAAS 法是近年来的一个进展。至今受到人们关注，它是将氢化物富集在用难熔金属涂覆处理过的石墨管内，然后原子化。当石墨管涂 Pd 时富集效率

大幅度提高。其中实例有：在涂 Pb 石墨炉中测硒[106]，涂锆石墨管中测 Pb[107]，涂银石墨管中测 Se 和 Te[108]。

氢化物-流动注射法是一种十分有前途的技术，有人研究了流动注射与氢化物原子吸收的联用技术[109]。

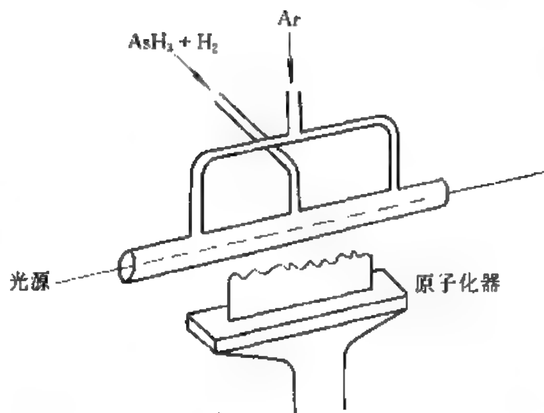


图 7-4　氢化物发生法示意图

三、干扰及其消除

（一）干扰类型

Smith (1975 年) 以硼氢化钠作还原剂，用氩-氢火焰作原子化手段，系统地研究了 48 种元素对砷、铋、锗，锑，硒和碲的干扰情况[110]，其结果是：①碱金属、碱土金属、硼、铝、镓、钛、锆、铪、汞、镧、锰、钒、镱等元素基本上无干扰；②铜、银、金、铂、钯、铑、钌、镍和钴往往产生比较严重干扰；③上述 8 种易形成共价氢化物的元素，除铋、碲以及汞对硒和锑没有干扰外，其他元素彼此都相互干扰。

氢化物原子吸收分析中干扰现象可分为凝聚相干扰和气相干扰，凝聚相干扰是指干扰发生在氢化物生成时及氢化物中样品溶液释放过程。发生在气相中的干扰为气相干扰，它发生在氢化物传输和原子化过程中。

（二）干扰机理

氢化物原子吸收分析中的干扰机理可概括为：①形成固态氢化物；②形成难溶化合物；③析出金属沉淀捕获氢化物；④产生氧化性气体；⑤催化作用；⑥消耗气相中的自由基；⑦价态效应。

（三）消除干扰的途径

针对实际分析样确定干扰类型和机理后可从以下途径出发确定消除干扰的方法。①选择最佳酸介质；②选择最佳还原剂及用量；③利用掩蔽作用；④预还原和冷阱捕集；⑤共沉淀和浮选分离；⑥电解和溶剂萃取分离；⑦色谱分离。

第九节　原子吸收光谱分析中间接测定技术

自 1968 年 Christian 等提出间接 AAS 法测定阴离子和有机物以来，该法获得了广泛的应用和发展，已有不少评述和专著[111,112]。所谓间接 AAS 法就是基于利用某一或一个以上的化学反应，使待测物转化为可用原子吸收光谱分析法测定的形式。它既可以直接测定反应产物本身，也可以测定反应物的过量试剂。目前 AAS 间接测定法主要用于以下物质的测定。

①难熔金属元素的测定。由于难熔金属元素原子化效率低，故测定灵敏度差，如何使之转化为灵敏的测定形式，是间接法研究的内容。

②非金属元素和阴离子的测定。AAS 法一般不能直接测定非金属元素（卤素、S、P、O、N 等）和阴离子。

③有机物的测定。除了一些含有可测金属元素的有机试样可供直接分析外，对大多数的有机物是利用它们具有螯合性，还原性或氧化性基团与金属元素或离子反应，转化为可被 AAS 测定的形式。对不含上述基团的有机物，可通过分解、氧化、酶解等反应转化后再进行

测定。

AAS 间接测定法按其所用的化学反应或某一特性可分为以下几类：

(1) 利用氧化还原反应的方法　具有氧化性或还原性功能团的有机化合物或非金属和阴离子可与金属元素或金属离子反应，用 AAS 测定产生或过剩的金属离子，可求得被测物含量。例如，用金属 Cd 定量还原氯霉素，生成的 Cd 离子经分离后用 AAS 测定求得氯霉素含量；在 Mn^{2+} 存在下，OH^- 使 Ag^+ 还原成 Ag，用 AAS 测定过量的 Ag^+ 来间接测定 OH^-。

(2) 利用沉淀反应的方法　加入某种试剂与被测阴离子或有机物作用形成难溶化合物，通过测定沉淀物或滤液中的阳离子可求得被测物含量。例如 Cu^{2+} 或 Ag^+ 与磺胺作用，分离生成的沉淀，测定滤液中过量的 Cu^{2+} 或 Ag^+ 可求得磺胺含量。常利用 Cl^- 与 Ag^+ 生成难溶 AgCl 沉淀，通过测定滤液中过量 Ag^+，或将沉淀溶于氨水中，测定溶液中 Ag^+，可求得试样中氯含量。

(3) 利用配位反应和离子缔合反应的方法　利用阳离子与待测阴离子形成螯合物或离子缔合物，特别是利用带电荷的金属配合物与带相反电荷的有机待测物之间形成离子缔合物的反应，通过测定有机相中的金属离子便可间接测定被测物。例如基于 Zr 能形成稳定的 $Zr^{2+}\cdot[ZnF_6]^{2-}$ 离子对，被氯仿萃取，HCl 反萃，测定反萃液中的 Zn，便可间接测定 Zr。用 1，2-二氯乙烷萃取有机碱—$CO(SCN)_4^{2-}$ 离子缔合物，AAS 测定有机相中的 Co 可测定异戊卡因、罂粟碱等。

(4) 利用置换反应的方法　加入待测物将某一难溶化合物中某一成分定量置换出来，对置换物中金属元素的测定可间接测定阴离子。例如在弱酸性溶液中，SO_4^{2-} 可与铬酸钡悬浮液发生置换反应，通过测定滤液中的 CrO_4^{2-}，可间接测定 SO_4^{2-}。

(5) 利用化学放大反应的方法　化学放大反应是将待测物与钼杂多酸反应，生成配合物或沉淀后，测定杂多酸中的 Mo。例如钼杂多酸可定量沉淀咖啡因，将生成的沉淀消化或用 MIBK 萃取后，用 AAS 法测定。

(6) 利用形成杂多酸化学反应的方法　被测物与钼酸根等离子形成杂多酸化合物，经萃取分离后，通过测定杂多酸中金属元素，以求得待测物含量。例如，AAS 间接法测定 P，大多是利用形成二元或三元杂多酸。

(7) 利用酸碱反应的方法　利用酸碱反应 AAS 间接法　测定有机酸碱的例子不多，如利用 $CaCO_3$ 悬浮液与有机酸作用，AAS 测定清液中 Ca^{2+}，可间接测定有机酸。

(8) 利用酶反应的方法　利用有机物的酶解产物与金属离子作用可测定这类化合物。如用 β-葡糖苷酶酶解苦杏仁苷，释放出的氰化物与 Ag^+ 作用，用 AAS 测定 $[Ag(CN)_2]^-$ 的含量间接测定苦杏仁苷。

(9) 利用对分析信号的增强或抑制的方法　若一种元素能增强或抑制另一种元素原子的吸收信号，且其变化与影响元素含量呈线性关系，则可由此间接测定其含量。例如利用 Al 或 Ti 对 Fe 的吸收信号的增感效应，利用火焰-AAS 间接法测定痕量 Al 或 Ti。

今后 AAS 间接法的研究，一是进一步开拓和应用各种反应（四大平衡反应仍是需要开拓的领域）；二是发展和更新分离技术，特别是与 GCLC 的联用。间接 AAS 方法突破了 AAS 只能测无机元素的限制，开辟了新的研究领域。

第十节　石墨炉原子吸收绝对分析法

1955 年 Walsh 提出 AAS 分析时，就认为基于锐线光源共振吸收的 AAS 法可能成为无标

准分析或绝对分析法。L'vov[113]认为：人们对电热原子化技术的兴趣主要是因为它与拟定AAS的绝对分析方法有密切关系。1984年Slavin[114]发表了"现代GFAAS与无标准分析"一文，以Cd的特征质量（charateristic mass）m_0来说明利用特征质量求得Cd含量的可能性。要实现GFAAS绝对分析必须首先消除基体干扰，目前普遍认为由Slavin[115]等人在L'vov平台技术的基础上提出的"稳定温度平台石墨炉"（Stabilized Temperature Platform Furnace，简称STPF）技术，是消除基体干扰的有效方法。STPF技术包括：使用L'vov平台，热解涂层石墨管，快速升温，灰化与原子化温度之差不大于1000℃，采用氩气作载气及原子化时停气，积分吸收信号，使用基体改进剂，快速电子信号检测及塞曼效应扣除背景。横向加热石墨原子化器（THGA）的问世，从根本上提供了时间和空间等温的理想环境，为实现绝对分析创造了最佳条件。

石墨炉原子吸收光谱绝对分析法是以特征质量 m_0 为基础的，可用下式计算分析元素的含量。

$$m=\frac{m_{OE}\cdot Q_A}{0.0044}$$

式中，m 为待测物质量（pg）；Q_A 为分析元素的净积分吸收信号；m_{OE}为待测元素特征质量实验值。

GFAAS绝对分析的研究实质上是围绕元素的特征质量展开的[116]，元素的 m_{OE}不仅可作为仪器质量的量度，而且是验证 m_0 理论值正确性的指标。m_{OE}值的计算方法为

$$m_{OE}=\frac{0.0044}{S}=\frac{0.0044m}{A\cdot S}$$

式中，S 为分析校正曲线的斜率；m 为待测物质量（pg）；$A\cdot S$ 为积分吸收信号；m_{OE}为待测元素特征质量实验值［$m(\text{pg})/0.0044A\cdot S$］。

L'vov等人运用原子光谱中的基本理论参数和实验数据，推导出了计算特征质量（m_0）值的理论公式：

$$m_{o,cal}=5.08\times10^{-13}\frac{MD\Delta\sigma_D}{H(a,\omega)\gamma' f}\cdot\frac{Z(T)}{g\exp(-E/KT)}\cdot\frac{r^2}{l^2}$$

式中，M 为被测元素的摩尔质量，$g\cdot mol^{-1}$；D 是原子在氩气中的扩散系数，$cm^2\cdot s^{-1}$；$\Delta\sigma_D$ 是吸收线多普勒变宽宽度，cm^{-1}；$H(a,\omega)$为Voigt函数；γ' 是发射线超精细结构和多普勒宽度校正系数；f 是振子强度；$Z(T)$ 是配分函数；g、E 是低能级统计权重和能量，J；K 是Boltzman常数（$1.38\times10^{-23}J\cdot K^{-1}$）；$T$ 是热力学温度，K；r、l 是吸收层半径和长度。
式中各参数的算法请参见文献[113]。

L'vov使用了更精确的物理参数重新计算了35种元素的特征量，取得了更好的结果。

Gilmutdinov[117]认为L'vov所使用的扩散系数和振子强度等物理参数并不可靠，因此要实现绝对分析这个目标首要任务是获得可靠的物理参数。目前借助STPF技术去实现绝对分析时要使用基体改进剂，上面的理论模型中没有考虑基体改进剂的作用。该理论模型还需进一步完善。

表7-9列出了由L'vov得到的各元素特征量的理论值和计算值，表7-10列出了部分稀土元素和铂族元素的特征量的理论估计值。

表 7-9 L'vov 得到的各元素特征量的理论值和计算值

元 素	λ/nm	T/K	M/(g·mol⁻¹)	D/(cm²·s⁻¹)	$\Delta\nu_D$/cm⁻¹	a	P(ω,a) (a=0.7a时)	r	f	$g_i\exp(-E_i/KT)/Z(T)$	m_0/pg 计算值	m_0/pg 实验值	$m_{0计算}/m_{0实验}$
Li	670.8	2700	6.9	15.0	0.271	[illegible]	[illegible]	0.50	0.75	1.00	0.46	1.1	0.42
Na	589.0	2800	23.0	7.0	0.120	0.71	0.47	0.70	0.76	1.00	0.49	[illegible]	0.98
K	766.5	2100	39.1	5.3	0.095	1.59	0.24	0.91	0.67	1.00	0.65	[illegible]	0.73
Rb	780.0	2100	85.5	4.6	0.065	2.02	0.155	0.475	0.65	1.00	[illegible]	3.5	0.68
Cs	852.1	2300	132.9	4.3	0.038	1.27	0.17	0.58	0.32	1.00	3.5	7.2	0.48
Cu	324.8	2600	63.5	5.9	0.141	0.30	0.73	0.53	0.71	1.00	3.1	3.0	1.03
Ag	328.1	2300	107.9	3.4	0.098	0.55	0.54	0.70	0.45	1.00	1.1	1.9	0.58
Au	242.8	2400	197.0	4.0	0.133	0.52	0.55	0.55	0.27	0.99	5.4	7.9	0.68
Be	234.9	2700	9.0	15.8	0.325	0.11	0.87	1.00	1.36	1.00	0.03	0.045	0.71
Mg	285.2	2500	24.3	7.2	0.205	0.29	0.73	0.56	1.7	1.00	0.03	[illegible]	1.07
Ca	422.7	3000	40.1	6.9	0.178	0.40	0.57	1.50	1.54	1.00	0.25	0.54	0.48
Sr	460.7	2800	87.6	4.8	0.098	0.73	0.45	1.30	1.54	1.00	0.50	0.95	0.52
Ba	553.6	2900	137.3	4.7	0.052	1.06	0.34	0.31	(0.362) 1.4	0.63	(1.71) 0.64	7.8	(0.206) 0.50
Zn	213.9	2000	65.4	5.4	0.185	0.40	0.53	0.85	1.28	1.00	0.51	0.40	1.28
Cd	228.8	1800	112.4	3.6	0.127	0.67	0.46	1.30	1.25	1.00	0.48	0.39	1.23
Hg	253.7	1500	200.5	1.8	0.072	0.93	0.37	0.25	0.53	1.00	54	52	1.04
Al	309.3	2700 2700	27.0 27.0	8.7 8.7	0.232 0.232	0.34	0.67	0.94	0.23 0.72	0.35	8.1 4.1	10.8 5.9	0.69 0.69
Ga	294.4 287.4	2600	69.7	6.0	0.152	0.61	[illegible]	0.60	[illegible]	0.47	9.1	9.8	0.93
In	303.9	2500	114.8	4.6	0.127	1.00	[illegible]	0.57	[illegible]	0.67	7.5	9.6	0.78
Tl	276.8	2100	204.4	3.0	0.059	1.40	0.25	0.65	0.29	0.59	8.2	9.6	0.85
Si	251.6	2900	28.1	9.4	0.283	0.68	0.57	1.30	0.19	0.58	13	67 40	0.19 0.33
Ge	265.2	2900	72.6	6.0	0.172	0.58	0.57	1.00	0.84 (0.453)	0.42	2.7 (6.0)	30	0.09 (0.20)
Sn	224.6 286.3	2500 2500	118.7 118.7	5.1 5.1	0.141 0.115	0.82	0.50	0.80	0.23	0.37 0.35	12.5 13	19 20	0.65 0.65
Pb	217.0 283.3	2100 2100	207.2 207.2	3.4 3.4	0.104 0.059	1.42	0.25	0.47	[illegible]	0.98 0.98	7.0 11	4.1 7.7	1.69 1.59
Ti	[illegible]	2900	47.9	8.5	[illegible]	0.42	0.61	1.70	0.26	0.35	10	30	0.31
P	213.6	2850	31.0	9.8	0.331	0.10	0.87	0.82	0.13	0.0048	1320	1240	1.07
As	193.7 197.2	2500 2500	74.9 74.9	5.7 5.7	[illegible] [illegible]	0.34	0.67	1.00 1.00	0.99	1.00 1.00	[illegible] [illegible]	[illegible] [illegible]	0.91 0.91
Sb	217.6 231.1	2600 2600	121.7 121.7	4.8 4.8	0.151 0.143	0.50	0.42	1.30	0.242	0.99 0.99	20 34	18 30	1.13 1.13
Bi	223.1 306.8	2100 2100	209.0 209.0	3.4 3.4	0.101 0.074	1.29	0.30	0.30	0.15	1.02 1.02	8.0 23	7.6 22	1.05 1.05

续表

元素	λ/nm	T/K	M/(g·mol⁻¹)	D/(cm²·s⁻¹)	Δσ/cm⁻¹	a	H(a,ω)(ω=0.75a,0)	ε	f	$g_l\exp(-E_l/kT)/Z(T)$	m_0/pg 计算值	m_0/pg 实验值	$m_{计算}/m_{实验}$
V[②]	318.4	3000	50.9	8.6	0.172	0.7	0.51	1.00	0.26	0.30	77	39[④]	0.89
Sr	195.1	2600	21.0	5.6	0.235	0.19	0.80	1.00	0.55[③]	0.81	16	19	0.84
Te	214.3	2700	127.6	4.2	0.140	0.48	0.74	1.00	0.29	0.50	19	19	1.00
	225.9	2700	127.6	4.2	0.149				0.2075	0.50	115	116	0.99
Cr	357.9	2700	52.0	7.7	0.149	0.56	0.66	1.00	0.34	0.55	1.6	1.6[④]	0.99
Mo	313.3	3000	95.9	8.2	0.128	0.38	0.66	1.00	0.20	0.98	3.0	5.4[④]	0.56
Mn	279.5	2500	54.9	8.6	0.173	0.10	0.90	0.42	0.58	0.99	1.5	1.7	0.94
Fe	248.3	2600	55.8	6.5	0.103	0.47	0.79	1.00	0.55	0.43	2.7	2.6[④]	1.06
Co	240.7	2600	58.9	6.4	0.104	1.03[③]	0.95	1.00	0.40	0.46	6.9	5.4	1.22
Ni	232.0	2600	58.7	6.6	0.231	0.66	0.67	1.00	0.26	0.36	5.3	7.5	0.71
Eu[②]	459.4	2800	152.0	5.3	0.057	1.17	0.31	0.77	0.00	0.99	2.2	2.7[④]	0.25
Er[②]	400.8	3000	167.2	5.8	0.076	1.00	0.36	1.00	0.48	0.92	2.7	23[⑤]	0.12
Yb[②]	398.8	3000	173.0	5.7	0.074	1.11	0.35	1.00	1.12	1.00	1.1	1.6	0.69
Eu	459.4	2800	152.0	5.3	0.057	1.17	0.31	0.77	0.96	0.99	2.2	6.6[⑥]	0.33[⑥]
												9.7	0.23
Gd	407.9	3000	157.3	6.2	0.076	1.00	0.36	1.00	0.46 (0.0370)	0.278	9.4 (185)	300[⑥]	0.031 (0.500)
Tb	432.6	3000	158.9	6.5	0.071	1.00	0.36	1.00	0.11 (0.0539)	0.744	14.5 (82)	310[⑥]	0.047 (0.200)
Dy	421.2	3000	162.5	7.1	0.072	1.00	0.36	1.00	0.37	0.87	4.15	15[⑥]	0.26
Ho	410.4	3000	164.94	5.9	0.0735	1.00	0.36	1.00	0.37	0.94	3.99	18[⑥]	0.22
Er	400.8	3000	167.2	5.9	0.077	1.00	0.36	1.00	0.44	0.92	2.7	23	0.12
Tm	371.8	3000	168.9	7.5	0.0802	1.00	0.36	1.00	0.17	0.99	4.6	18[⑥] 7.0	0.64
Yb	398.8	3000	173.04	5.8	0.074	1.11	0.35	1.00	1.12	1.00	1.1	1.6 1.1[⑥]	0.69 1.00
Lu	336.0	3000	175.0	5.6	0.067	1.00	0.36	1.00	0.05	0.885	35	145[⑥]	0.57
U	358.5	3000	238.1	5.9	0.073	1.00	0.36	1.00	0.16 (0.0138)	0.539	19 (325)	1600[⑥]	0.012 (0.200)
Ru	349.9	3000	101.7	5.9	0.154	1.17	0.31	1.00	0.15	0.403	35	32[⑤]	1.09
Rh	343.5	3000	102.9	6.6	0.138	1.17	0.31	1.00	0.27	0.536	13.4	12[⑤]	1.12
Pd	244.8	3000	106.4	5.4	0.134	1.17	0.31	1.00	0.10	0.373	24.7	24[⑥]	1.03
	247.6	3000	106.4	5.4	0.137	1.17	0.31	1.00	0.10	0.372	24.7	24[⑥]	1.03
Ir	264.0	3000	192.2	5.9	0.106	1.17	0.31	1.00	0.056	0.709	86	275[⑥]	0.31
Pt	265.9	3000	195.1	5.9	0.105	1.17	0.3	1.00	0.097	0.415	65	102[⑤]	0.63

① 用……预处理过的石墨管。

② 十直接从PCT中三蒸发，其余从平台蒸发。

③ 与……不可靠的数据。

④ ……213.9nm/215.68nm 强度比为130/72。

⑤ 在相同实验条件下，两条分析线通过实验得到的数据。

⑥ 由于所取 D, a, ε, f 值不可靠，仅供参考。

表 7-10 稀土元素和铂族元素特征量的理论估计值

元素	λ/nm	T/K	M/(g·mol^{-1})	D/(cm^2·s^{-1})	$\Delta\sigma_D$/cm^{-1}	a
Sc	391.2	3000	45.1	8.5	0.148	1.00
Y	410.2	3000	88.92	6.9	0.100	1.00
La	550.1	3000	138.9	5.9	0.0597	1.00
Ca	463.2	3000	140.1	6.0	0.071	1.00
	520.0	3000	140.1	6.0	0.058	1.00
Pr	495.1	3000	140.9	6.4	0.066	1.00
Nd	463.4	3000	144.3	6.8	0.0696	1.00
	492.4	3000	144.3	6.8	0.0656	1.00
Sm	429.7	3000	150.4	7.3	0.074	1.00
	484.2	3000	150.4	7.3	0.0657	1.00

元素	$H(a,\omega)$ ($\omega=0.72a$ 时)	r	f	$\frac{g_1\exp(-E_1/KT)}{Z(T)}$	m_0/pg 计算值	m_0/pg 实验值	$\frac{m_{0计算}}{m_{0实验}}$
Sc	0.36	1.00	0.67	0.57	2.41	11+	0.22
Y	0.36	1.00	0.27	0.528	6.97	44+	0.16
La	0.36	1.00	0.025	0.283	112	900+	0.12
Ca	0.36	1.00		0.123		35000+	
	0.36	1.00		0.032		40000+	
Pr	0.36	1.00		0.461		450+	
Nd	0.36	1.00	0.07	0.381	41	270+	0.15
	0.36	1.00	0.07	0.381	39	270+	0.15
Sm	0.36	1.00	0.44	0.104	29	110+	0.26
	0.36	1.00	0.33	0.104	35	140+	0.25

参 考 文 献

1 郑永章，刘纪琳．稀有金属，1982；6(4)：45
2 柳志龙，张国莹．分析化学，1987；15(5)：432
3 莫胜钧，朱传义．东北师大学报(自)，1983；(4)：111
4 李绍南，赵建国．光谱学与光谱分析，1984；4(5)：42
5 池克等．分析试验室，1994；13(6)：52
6 佟淑娟等．光谱实验室，1995；12(1)：50
7 师长宏等．理化检验(化)，1995；31(1)：41
8 王沐昕等．国外分析仪器技术与应用，1995；(4)：57
9 贾睿等．理化检验(化)，1995；31(2)：101
10 Lau C，et al. Can J Spectrosc，1976；21：100
11 卢志昌等．云南冶金，1984；(6)：42
12 金关莲等．环境科学与技术，1984；(3)：24
13 黄淦泉．分析仪器，1985；(2)：43
14 Watling R J. Anal Chim Acta，1977；94：181
15 卢志昌等．云南冶金，1984；(6)：52
16 蒋永清等．分析试验室，1988；7(10)：36
17 米瑞华．光谱学与光谱分析，1990；10(3)：60
18 黄淦泉等．高等学校化学学报，1992；13(8)：1057
19 黄淦泉等．分析化学，1986；14(8)：593
20 黄淦泉等．光谱学与光谱分析，1986；7(2)：60
21 燕庆元等．地质实验室，1987；3(3)：170
22 孙书菊等．分析化学，1987；15(2)：159
23 李银玉等．理化检验(化)，1990；26(4)：213
24 李银玉等．分析化学，1988，16(11)：1006
25 刘立行等．分析化学，1990；18(6)：58
26 刘立行等．分析测试通报，1990；9(4)：31
27 黄淦泉等．分析化学，1993；21(8)：935
28 黄淦泉等．分析科学学报，1994；10(1)：32
29 黄淦泉等．理化检验(化)，1994；30(5)：278
30 张明英等．光谱学与光谱分析，1993；13(4)：97
31 张明英等．光谱学与光谱分析，1994；14(3)：101
32 张明英等．光谱学与光谱分析，1993；13(3)：65
33 赵进沛．广东微量元素科学，1995；2(3)：33
34 黄淦泉等．冶金分析，1995；15(3)：16
35 郭明等．光谱学与光谱分析，1996；16(1)：113

36 Sun Han-wen et al. J of Anal Atom Spectrom，1996；11(4)：265
37 杨海燕等．分析科学学报，1995；11(2)：35
38 张志恒等．光谱实验室，1995；12(2)：48
39 魏复盛，齐文启编著．原子吸收光谱及其在环境分析中的应用．北京：中国环境科学出版社，1988
40 Kurfürst U et al. Z Anal Chem，1990；337：248
41 马平玉等．光谱学与光谱分析，1994；14(5)：79
42 张在整等．分析试验室，1994；13(2)：72
43 张佩瑜等．岩矿测试，1994；13(2)：96
44 傅学起等．分析化学，1995；23(9)：1109
45 张秀荣等．理化检验(化)，1996；32(6)：340
46 张克荣等．理化检验(化)，1990；26(5)：304
47 罗淑梅等．光谱学与光谱分析，1988；8(6)：44
48 陈天裕等．光谱学与光谱分析，1988；8(3)：45
49 梅念声等．理化检验(化)，1988；24(6)：322
50 钱蜀等．分析测试通报，1990；9(4)：71
51 钱蜀等．分析化学，1990；18(11)：1064
52 徐伯兴等．分析测试通报，1990；9(2)：67
53 沈铭能等．分析化学，1990；18(1)：68
54 胡庆兰．分析化学，1991；19(8)：908
55 彭喜雨等．光谱学与光谱分析，1992；12(3)：97
56 钱蜀等．理化检验(化)，1991；27(1)：25
57 马玉平等．岩矿测试，1991，10(增刊)：2
58 汤又文等．高等学校化学学报．1995；16(12)：1865
59 何华焜等．分析化学。1988；16(5)：472
60 何华焜．分析测试通报，1984；3(3)：1
61 何华焜．光谱学与光谱分析，1982；2(3.4)：237
62 Harnly J M et al. Anal Chem，1977；49：459
63 Harnly J M et al. Spectrochim Acta，1984；39B(213)：305
64 李梅主编．原子吸收分析中的基体改进技术(分析化学译刊) 1989；6(6～7)
65 单孝全等．环境化学，1987；6(4)：34
66 БЕЙЗЕЛЬ Н ф. ЖурНаl Аналитической хииии，1993；48(8)：1254
67 高英奇等．稀有金属，1982；1(2)：99
68 刘纪琳．分析化学，1983；11(7)：555
69 高英奇等．原子光谱分析，1981；(4)：28
70 刘纪琳等．分析试验室，1982：(1)：58
71 Zatka V J. Anal Chem，1978；50(3)：538
72 林守麟等．分析试验室，1986；5(1)：22
73 Lagas P. Anal Chim Acta，1978；98(2)：261
74 姚金玉等．光谱学与光谱分析，1984；4(4)：40
75 马怡载等．化学通报，1982；(2)：22
76 马怡载等．分析化学，1986；14(10)：746
77 刘强等．分析试验室，1993；12(3)：40
78 吴廷照等．光谱学与光谱分析，1982；2(1，2)：74
79 刘纪琳等．分析试验室，1986；5(8)：31
80 王鹤泉等．分析仪器，1987；(3)：5
81 陶冠红，方肇伦．痕量分析，1991；7(1)：4
82 方肇伦．《分析化学进展》，1994，10 南京
83 Fang Zhaolum. Flow Injection Atomic Absorption Spectrometry，John Wiley and Son Let. Baffins Lane，Chichester，West Sussex PO191VD Langland，1995
84 R ŮŽI ČKA J. et al. 流动注射分析．北京：北京大学出版社，1991
85 方肇伦等．分析试验室，1989；8(4)：75
86 方肇伦等．分析试验室，1991；10(4)：116
87 徐淑坤．分析试验室，1993；12(2)：80
88 谭爱民等．分析试验室，1995；14(6)：94
89 李金祥等．光谱学与光谱分析，1989；9(5)：26
90 Li Yong-Xiang et al. Analyt Chim Acta，1990；231：151
91 Zhang Shu-Zhen et al. Analyt Chim Acta，1989；221：85
92 Alessando D'ulivo et al. J Anal Atom Spectrom，1989；4：319
93 Wickstroem T et al. J Anal Atom Spectrom，1991；6：389
94 廖一平等．分析化学，1994；22(1)：19
95 郭小伟等．光谱学与光谱分析，1996；16(3)：88
96 Azn árez J et al. Analyst，1984；109：123
97 Nerin C et al. Mikrochim Acta，1989；3(1)：91

98 吴廷照等．分析化学，1983；11(1)：8
99 吴顺来．光谱学与光谱分析，1984；4(3)：48
100 吴湘伟．分析化学，1984；12(7)：613
101 郭小伟等．分析化学，1981；9(3)：258
102 张佩瑜．分析化学，1989；17(10)：940
103 宣维康．分析试验室，1988；7(12)：40
104 杨密云等．光谱学与光谱分析，1986；6(1)：38
105 张佩瑜等．理化检验(化)，1989；25(5)：291
106 Zhang Li et al. Can J Appl Spectros，1991；36：47
107 Yan Xiuping et al. J Anal Atom Spectrom，1991；6(6)：483
108 Ni Zheming et al. J Anal Atom Spectrom，1993；8(7)：995
109 Guo Tiezheng et al. J Anal Atom Spectrom，1992；7(4)：667
110 李述信主编．原子吸收光谱分析中的干扰及消除方法．北京．北京大学出版社，1987(分析化学译刊，1987；4(9-12)
111 陈浩等．光谱学与光谱分析，1992；12(3)：65
112 王吉德等．分析科学学报；1995；11(2)：74
113 L'vov B V. Spectrochim Acta，1990；45B：633
114 Slavin W. Anal proc，1984；21：59
115 Slavin W et al. Anal Chem，1979；51：261
116 杨为民等．光谱学与光谱分析，1997；17(2)：104
117 Gilmutdinor D. J Anal At Spectrom，1997；7：474

第八章　原子吸收光谱分析步骤、测定条件及应用

第一节　原子吸收光谱分析的一般步骤

原子吸收光谱分析的一般步骤包括样品制备，测定条件的选择和分析方法的确定。这部分内容在有关原子吸收分析的专著上都有较详细的介绍。

一、样品制备

（一）取样

取样要有代表性，取样量多少取决于试样中被测元素性质、含量、分析方法及测定要求。

（二）被测试样的处理

有关原子吸收光谱分析的样品预处理已有综述和专著介绍[1,2]，一般对溶液样品视试样浓度进行稀释或浓集。水溶液样品和水溶性液体及固体样品用水稀至合适浓度范围，有机样品可用甲基异丁酮、石油溶剂或其他合适的有机溶剂稀至样品粘度和水粘度相近。固体样品先要用合适的溶剂和方法溶解。SH-02 型自控电热石墨消化器[3]以及 UY-Ⅱ型紫外消化反应器[4]可用于食品的前处理。高压密闭溶样也被广泛使用，如利用聚四氟乙烯压力消解器用于人发和硅酸盐岩的消解[5]。研究了土壤，沉积物以及猪肝的高压密闭的溶样条件[6,7]，生物样品的快速消解法[8]等。微波溶样技术在国内得到重视和应用，有关知识介绍查阅文献[9,10]，有人介绍了国际上通用的 MOS-81D 微波炉的应用[11]，在常压条件下进行植物及动物样品的微波溶样[12,13]，中药材中 Mn 等 7 个元素[14]、食品中 Pb 及 Cd[15]、头发中 As[16]、钒钛铁矿[17]、牛肝[18]、铜精矿[19]、氟石粉中 Hg[20] 等均可用微波消解。在线电解溶样是用于金属和合金的一种较好的方法[21,22]。酶-碱消化法可用于肉类中不同价态 Cr 的测定[23]。关于含金地质样品及土壤分解已有综述[24]。

（三）被测元素的分离和富集

分离共存干扰组分同时使被测组分得到富集是提高痕量组分测定相对灵敏度的有效途径。目前常用来分离和富集的方法有沉淀和共沉淀法、萃取法、离子交换法、浮选分离富集技术、电解预富集技术，及应用泡沫塑料、活性炭等的吸附技术，对分离富集技术的进展概况已有评述[25]。各种方法的评述有：共沉淀和电化学富集技术在原子光谱中的应用[26]、改性硅胶在痕量元素分离富集中的应用[27]、浮选分离富集技术的应用[28]、离子交换树脂在分析化学中的应用[29]、负载泡塑的应用等。在形态和价态分析中可采用共沉淀分离、流动注射在线分离及预富集、离子色谱-AAS 联用、化学修饰电极预富集、裂解色谱-AAS 联用、GC-AAS 联用、HPLC-AAS 联用、氧化铝柱在线富集等方案。从原则上说，在化学化析和其他仪器分析中用于试样预处理的分离方法也适用于原子吸收光谱分析。

（四）标准样品的配制

标准样品溶液的组成要尽可能接近未知试样的组成。标准贮备溶液的浓度最好不要低于

1.000mg·ml^{-1}，在配制时一般加入少量酸以免器皿表面吸附，通常贮存于聚四氟乙烯、聚乙烯或硬质玻璃容器中。非水标准溶液可将金属有机化合物溶于适宜的有机溶剂中配制（或将金属离子转变成）可萃取络合物，用合适的溶剂萃取，通过测定水相中的金属离子含量间接加以标定。

二、火焰原子吸收光谱测定条件的选择[30~32]

（一）吸收波长

从灵敏度的观点出发，通常选择由基态向第一受激态跃迁的共振吸收线做分析线。分析线应选用不受干扰而吸光度又适度的谱线，最灵敏线往往用于测定痕量元素，在测定较高含量时，可选用次灵敏线。这样能扩大测量浓度范围，减少试样不必要的稀释操作。从稳定性考虑，由于空气-乙炔火焰在短波区域对光的透过性较差、噪声大，若灵敏线处于短波方向，则可以考虑选择波长较长的次灵敏线。

设置测量波长的指示值会因仪器单色器的传动机构的问题、空心阴极灯新旧程度和灯电流大小的影响、室内温度变化及火焰散发热量的影响等因素导致和理论值不尽相同。在连续测量中，至少每隔 1h 应校核一次波长位置。设置波长位置的方法是从短波区向长波区转动波长刻度盘，在选定波长附近位置慢慢调节至空心阴极灯辐射的能量最大，即是选定波长的准确位置。喷雾一个浓度适中的标准溶液到火焰中进行测定，复核一下在该波长位置的吸光度是否为最大。目前的仪器大都具有自动寻峰功能，故毋需采用以上的方法。

（二）光谱通带宽度的选择

光谱通带宽度直接影响测定灵敏度和校准曲线的线性范围，单色器的光谱通带宽度取决于出射狭缝宽度和倒数线色散率

$$\Delta\lambda = D \cdot S$$

式中，$\Delta\lambda$ 为光谱通带宽度；D 为分光器的倒数线色散率；S 为狭缝宽度（mm）。对确定仪器 D 是固定的 $\Delta\lambda$ 仅由 S 决定。

（三）空心阴极灯的工作电流

一般是在保证稳定放电和合适的光强输出前提下，尽可能选用较低的工作电流。灯电流高，灯丝发热量大，导至热变宽和压力变宽，并增加自吸收，使辐射的光强度降低，结果是灵敏度下降、校正曲线下弯，灯寿命缩短。寻找最佳工作电流的方法是，固定其他测量条件，喷雾某一固定浓度溶液，改变灯电流和增益负高压数值，测量吸光度，绘制吸光度-灯电流关系曲线。以选择灵敏度高，增益负高压在 300～800V 之间的值为佳。为了使灯的光强度达到稳定输出，一般需预热（10～30min），若灯发射的能量已稳定、仪器基线稳定，测定几个标准溶液，若吸光度值稳定，说明预热时间已够。为使空心阴极灯发射强度稳定，要保持空心阴极灯石英窗口洁净，点亮灯后要盖好灯室盖子，测量过程不要打开，使外界环境不破坏灯的热平衡。

（四）原子化条件的选择

1. 火焰的选择

不同的元素可选择不同种类的火焰，原则是使待测元素获最大原子化效率。易原子化的元素用较低温火焰，反之就需要高温火焰。当火焰选定后，要选用合适的燃气和助燃气的比

例。对于难原子化元素宜选用富焰，对于那些氧化物不十分稳定的元素可采用贫焰或化学计量火焰。调节时要在燃烧点火的工作条件下调节，并经常检查一下设定值是否有变动、并及时校正。

2. 燃烧器高度的选择

选择火焰燃烧器高度，要使来自空心阴极灯的辐射从自由原子浓度最大的火焰区域通过，以获得最高灵敏度。其实验方法可在其他测试条件不变的条件，喷雾待测元素的标准溶液，改变燃烧器高度，测其吸光度，绘制吸光度对燃烧器高度的关系曲线，找出最佳燃烧器高度。

3. 燃烧器角度的选择

在通常情况下其角度为0°，即燃烧器缝口与光轴方向一致。在测高浓度试样时，可选择一定的角度，当角度为90°时，灵敏度仅为0°时的1/20。

4. 试液提升量的选择

试液吸入量遵守 Poisuue 公式：

$$V=\pi R^4\Delta p/8\mu L$$

式中，V 是试液量（$cm^3\cdot s^{-1}$）；R 是毛细管内径（cm）；Δp 是压强差（$g\cdot cm^{-2}$）；μ 为试样粘度（$g\cdot cm^{-3}$）；L 是毛细管长度（cm）。通常试液提升量为（4～6）$ml\cdot min^{-1}$。

提升量的观测方法是：试液装至10ml量筒刻度，开始吸喷时计时，求出每分钟吸入量。

调节提升量的方法，是根据试液粘度选用适当粗细的毛细管，然后改变压缩空气的压强来调节提升量至所需值。为保持恒定的提升量，要固定试样溶液位置。试液温度要与室温一至，各连接处勿漏气。

三、无火焰原子吸收光谱测定条件的选择

在无火焰原子吸收测定中仪器参数的选择，包括波长、光谱通带和灯电流的选择等，其原则和火焰原子吸收法相同，有关数据参见表8-3。

（一）原子化器种类的选择

一般中低温原子化元素选择普通石墨管原子化器，对于容易生成难熔碳化物的金属元素，如Ti、Zr、Hf、V、Nb、Ta、Mo、W、Si、B、Y、稀土、U、Th等，可选用热解涂层石墨管或金属舟皿、金属涂层的石墨管。一些元素，如Pt、Rt，铂族元素等与W、Ta在高温下能生成金属间化合物，故不宜用涂W、Ta的原子化器。

（二）原子化器位置的调节

在光路调整好后，插入石墨炉并进行位置调节，以光经过石墨炉后光强损失最小为佳。对棒状原子化器定位十分严格，通常调整到让光路紧贴在棒的上方通过，舟皿原子化器亦如此。

（三）载气选择

可使用惰性气体氩或氮作载气，通常使用的是氩气。采用氮气作载气时要考虑高温原子化时产生CN带来的干扰。载气流量影响灵敏度和石墨管寿命，目前大多采用内外单独供气方式，外部供气是不间断的，流量在（1～5）$L\cdot min^{-1}$；内气流在（60～70）$ml\cdot min^{-1}$，在原子化期间可停气，内气流的大小随元素而定，可通过试验确定。

（四）冷却水

为使石墨管温度迅速降至室温，通常使用水温为20℃，水流量为(1～2)L·min^{-1}的冷却水，可在(20～30)s冷却，水温不宜过低，流速不宜过大以免在石墨锥体或石英窗上产生冷凝水。

（五）加热程序的选择

1. 干燥

干燥温度应比溶剂沸点略高，水溶液约(100～110)℃，甲基异丁酮约(120～130)℃。干燥时间视取样量和样品中含盐量来确定，一般取样(10～100)μl时，干燥时间为(15～60)s。具体时间应通过试验确定。

2. 灰化

灰化温度和时间的选择原则，是在保证待测元素不挥发损失的条件下，尽量提高灰化温度以去掉比分析元素化合物容易挥发的样品基体，减少背景吸收。灰化温度和灰化时间由实验确定，即在固定干燥条件，原子化程序不变情况下，通过绘制 A-灰化温度或 A-灰化时间的灰化曲线找到最佳灰化温度和灰化时间。

3. 原子化

不同原子有不同的原子化温度，通常把产生最大信号时的最低温度定为原子化温度，这有利于延长石墨管寿命。当使用热解涂层石墨管时，最佳原子化温度随信号测量方式而改变。

原子化时间在记录仪上是表示这一原子化信号回到基线所需的时间，应尽可能短一些。(当采用峰值测量方式时，信号无需回到基线)又要以原子化完全为准。对易形成碳化物的元素，原子化时间可长一些，一般约为(8～15)s。

现在石墨炉增加了斜坡升温设施，它是一种连续升温设施，可用于干燥、灰化及原子化各阶段。

在编制斜坡升温干燥程序时要考虑以下准测：①干燥时间与试液体积和温度范围有关；②所需的最终干燥温度；③在最高干燥温度时采用附加的干燥时间。

在设定斜坡升温灰化参数时要考虑的因素是：①灰化时间与除去基体的数量的关系；②初始灰化温度和最终灰化温度；③斜坡升温灰化速率受石墨炉中所发生的化学反应影响。

在设定斜坡升温原子化阶段的参数时要注意：①初始原子化温度与最终灰化温度相同；②采用停气方式有可能不利；③最高原子化温度可能高于或低于同一元素标准溶液的最高原子化温度；④斜坡升温原子化速率应能获得由待测元素和基体所产生的信号间的最佳分辨。

目前生产的石墨炉已配有最大功率附件，最大功率加热方式即以最快的速率[(1.5～2.0)×10^3℃·s^{-1}]加热石墨管至预先确定的原子化温度。用最大功率方式加热可提高灵敏度并在较宽的温度范围内有原子化平台区，因此可以在较低的原子化温度下，达到最佳原子化条件，延长了石墨管寿命。

（六）石墨管的清洗

为消除记忆效应，可在原子化完成后，一般在3000℃，采用空烧的方法来清洗石墨管以除去残余的基体和待测元素。但时间宜短，否则使石墨管寿命大为缩短。

关于原子吸收方法研究中分析条件的优化可参见有关文献[33～36]。

四、分析方法

（一）标准曲线法

此方法是配制一组合适的标准溶液，分别测定其吸光度，然后绘制 A-c 校正曲线。在相同条件下，测定试样的吸光度，由标准曲线内插法求出试样中被测元素含量。亦可由一元线性回归，用最小二乘法求出回归方程，由该方程求被测元素含量。

（二）标准加入法

该方法是在一组几个等量被测试样中分别加入 c_0，c_1，……c_n 的被测元素，然后测定其吸光度，绘制吸光度对加入量的工作曲线。此工作曲线不过原点，外延工作曲线与横坐标相交，坐标原点和交点的距离即为所求的被测试样被测元素的含量 c_x。

当被测样品的组成不确知，而其量足够时可采用此法，但“与浓度有关的化学干扰”不能用这方法消除。在使用此种方法时要注意：一般采用加入四个量来制作加入法的外推曲线；只适用于线性范围；不能消除分子吸收干扰，只有在扣除背景吸收后，才能使用。

（三）内标法

本法是在标准试样和被测试样中，分别加入内标元素，测定分析线和内标线的吸光度比，并以吸光度比值与被测元素含量或浓度绘制工作曲线。内标法只适用于双通道型原子吸收光谱仪，常用的内标元素见表 8-1。

表 8-1 常用内标元素

待测元素	内标元素	待测元素	内标元素	待测元素	内标元素
Al	Cr	Cu	Cd，Mn	Na	Li
Au	Mn	Fe	Au，Mn	Ni	Cd
Ca	Sr	K	Li	Pb	Zn
Cd	Mn	Mg	Cd	Si	Cr，V
Co	Cd	Mn	Cd	V	Cr
Cr	Mn	Mo	Sr	Zn	Mn，Cd

第二节 火焰原子吸收光谱法元素的测定条件

本节表 8-2（见 412 页）给出了火焰原子吸收法各元素的测定条件、分析和测定上应注意的问题，表中有关仪器参数包括波长、狭缝宽度、光源、火焰种类、灵敏度、检出限量和最佳范围等数据，引自 CRC Handbook of Atomic Absorption Analysis；有关分析和测定中的注意问题参考了本书的第一版和穆家鹏编译的原子吸收分析方法手册。

表中波长一列中的第一个波长数据为首选波长，吸收线的波长中没有“*”号的是原子线，并且是从基态跃迁的，有“*”号的是从比基态稍高的能级跃迁的原子线，“**”号表示离子共振线。

第三节 无火焰原子吸收光谱法元素的测定条件

本节提供的无火焰石墨炉原子吸收测定条件可用来作为选择操作条件时的参考，要注意试样基体或试样中元素的化学形态的影响。表 8-3 中有关数据和备注中的注意事项引自穆家鹏编译的原子吸收分析方法手册和 Slavin 所著的石墨炉原子吸收光谱分析指南。

表中一些术语的定义：

表8-2 火焰原子吸收光谱法元素的测定条件

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Ag	328.1 338.3	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	3.5 5~6	0.002	0.05~4	阴、阳离子几乎无干扰，5%的盐酸及硝酸无干扰；5%硫酸或磷酸使吸收灵敏度下降；大量铝、钍的存在会降低干扰，碘酸盐、高锰酸盐和钨酸盐能沉淀银	使用低温火焰有干扰(物理干扰)时，有必要改用空气-乙炔火焰 萃取技术： APDC/MIBK 二丁基-硫-亚磷酸/MIBK 加硝酸或加二乙烯三胺可防止氯化银沉淀 大量铜的存在或使用Ag-Cu复合元素灯时，应注意狭缝的大小，避免可能干扰Ag 338.3nm
Al	309.3 396.2 308.2 394.4 237.3 236.7 257.5 256.8	0.7	HCL/EDL	富燃N_2O-乙炔(还原焰,红)	1.0 1.0 1.5 1.0 2.0 1.5 4.0~6.0 5.0~7.0	0.03	10~100	共存的阴、阳离子总浓度在2%以下几乎无干扰 Al的电离化随共存阴离子种类不同而变化	最好在含有0.1%钾的溶液中进行测定 309.3nm吸收线的灵敏度最高 燃烧器高度随燃烧器的种类不同而改变
As	193.7 189.0 197.2	0.7	HCL/EDL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝) 氩-氢	1 0.5 1.0~2.0	0.1	100	在193.7~197.2nm范围内有吸收的火焰气体和物种均干扰 氩氢火焰中Al、Ca、Cr、Co、Cu、Fe、Mg、Mo、Ni、Sr、V都有干扰	使用有机试剂，氩-氢焰不稳定 也可以用空气-氢火焰和氢化物法 189.0nm吸收线的灵敏度最高，但受光谱仪测定条件的限制 在紫外区测定时要选择火焰本身吸收少的条件
Au	242.8 267.6 312.3 274.8	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化焰,蓝) 空气-丙烷	0.3 0.2 90 10	0.01	2~20	使用低温火焰时，有干扰 用空气-乙炔时除电子以外几乎无干扰，尤其是贵金属除铂、钯以外几乎无干扰 受离子有干扰，特别是Sn的影响较大	由于阴离子的影响，有必要注意调整样品所用的酸 由于火焰条件对阴离子的干扰，有必要从贫燃到富燃之间选择最佳条件 萃取技术： 在稀盐酸或氢溴酸中的氯金酸离子-MIBK APDC/MIBK 冷却燃烧器要选用合适的富燃和贫燃；242.8nm吸收线最合适 火焰如采用贫燃，火焰温度降低，干扰相应增加，空气-丙烷干扰更多

续表

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
B	249.7 208.9	0.7	HCL	富燃 N_2O-乙炔(还原性,深红色)	13 27	0.70	400	当钠的浓度高于B时将有干扰	在存在背景光散射和分子吸收的含高固体的样品,高酸度、有机溶剂和其他复杂基体时,必需作背景校正 249.7、249.8nm两条吸收线如果分离不开,则将得到6mg·L⁻¹的检出限
Ba	553.6 350.1	0.4	HCL	N_2O-乙炔(还原性,富燃,红)	0.02 250	0.008	20	对于空气-乙炔火焰磷酸、硫酸有干扰,CaO分子吸收光谱也有干扰 氧化亚氮-乙炔火焰有90%以上的钡原子离子化	为了消除干扰,可分别使用低、高温火焰 使用高温火焰时要防止几种碱金属的电离化 CaO的分子吸收在使用高温火焰时能够除去,由于燃烧器种类的不同,干扰情况可能显著不同,以"预混合燃烧器"最为适宜 加入KCl和KNO_3可抑制Ba的电离,增加灯电流和减小灯电压可使钡的检测的噪声减为最小;在空气-乙炔火焰中钡的测定灵敏度减小,磷酸盐、硅和铝严重地降低其吸收度
Be	234.9	0.7	HCL	N_2O-乙炔(还原性,富燃,红)	0.01	0.002		Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}、BF_3、Cu有增感作用;Al使吸收减少(500mg·L⁻¹);Na、Mg、Si的浓度超过1000mg·L⁻¹有干扰	Be是有毒金属,必须注意燃烧后气体的排出 欲增加灵敏度,可添加乙二醇、乙酸乙酯 为抑制铝的干扰,可添加F^-或8-羟基喹啉 当空气-乙炔的灵敏度不够时,助燃气中可加入少量氧 燃烧气体的组成、燃烧器位置必需选择最适宜的条件
Bi	223.1 222.8 306.8 206.2 227.7	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.2~0.4 0.5 0.5~1.0 1.7~3.7 4.0~8.1	0.04	15	很少有测明显的干扰	APDC-甲基异丁基酮萃取在pH=1~6之间进行 使用223.1nm共振线时,为了使灵敏度增加可以添加有机溶剂 306.8nm谱线,由于OH自由基的吸收很强,但223.1nm处有这种吸收,因此在有些应用下为了吸收分析 燃烧器的种类,燃烧气体的组成对灵敏度影响较大
Ca	422.7 239.9	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.01 5~12	0.002	5	磷酸、硫酸、硅酸、铝等存在化学干扰;低温火焰的干扰尤为显著,对空气-乙炔焰还有电离化干扰	为了抑制化学干扰,采用富燃火焰或氧化亚氮-乙炔火焰,在后一场合,为了抑制离子化必须添加大量的碱金属 由于样品中有机物而出现测定误差时,可添加乙二醇 应保持一定的酸度,以避免钙水解引起吸光度变化,应添加氯化镧 燃烧器的位置、燃烧气体的组成对测定值及干扰有影响,为此需选择最适宜的条件

续表

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Cd	228.8 326.1	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化,贫燃,蓝)	0.01	0.0005	2	不存在化学和电离干扰，高浓度硅降低Cd的吸收	以DDTC-甲基异丁基酮萃取法最为适宜 应保持一定的酸度，酸度低时应加掩蔽剂，镉元素的蒸气压较高，光源共振线易产生自吸，因此宜使用低电流
Ce	495.2 571.1 473.7 492.5 505.3 501.3 491.4 502.7 504.6	0.4	HCL	N_2O-乙炔(还原性,富燃,红)	20~45 36.0~61.2 44.0 44.0~70.0 50.0~100.0 74.0~150 74.0~190 115.0 115.0	10.0	500		测定非常困难
Co	240.7 242.5 241.2 243.6 252.1 301.4 352.7 346.6 347.4 301.8 391.0	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化性,贫燃,蓝)	0.12 0.02~0.15 0.09~0.22 0.1~[illegible] 0.1~0.25 0.6~1.8 0.1~3.7 1.5~4.[illegible] 1.0~7.1 5.5~12.0 130	0.01	5	共存过渡元素和重金属元素在高浓度时有干扰，当Ni的浓度超过1500 mg·L⁻¹使Co的信号强度降低50%；Ca、Al有少许干扰	APDC-甲基异丁基酮在pH=2~4时进行萃取 酸度低，有氢氧化物生成，应保持一定的酸度 240.7nm共振线的自吸较大，由于存在240.8nm的邻近线，所以校正曲线发生弯曲 341.3nm附近有341.2nm的邻近线 钴有很多谱线，应使用窄的狭缝
Cr	357.9	0.7	HCL	N_2O-乙炔(还原性,富燃,红)焰	0.06	0.005	5	使用富燃焰时，许多金属离子及酸根均有影响	采用三缝燃烧器使火焰中的原子蒸气密度增高，必须选择合适的燃烧器高度
				空气-乙炔(还原焰)	0.08			铁的干扰较大；Ni^{2+}、Mn^{2+}、Cu^{2+}、Co^{2+}、W^{6+}、Al^{3+}、Mg^{2+}的干扰较小	选用357.9nm共振线为最合适 使用充入氖气的灯时，必须把359.3nm及357.9nm型的谱线分离
	359.3 425.4 427.5 428.9 520.8 520.5				0.15 0.2 0.23~0.29 0.24~0.27 12.0 30.0				359.3nm共振线有360.4nm邻近线，425.4nm有425.57nm邻近线 铬的谱线较多，狭缝宜窄小 在样品中存在镁时，用Mg(OH)Cl在357.9nm附近有分子吸收，应注意进行校正

续表

元素	λ/nm	光谱通带/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定时应注意的事项
Cr									根据分析对象有必要选择火焰的种类，燃烧气体的成比（例如，为了抑制铁的干扰，采用富燃火焰，并添加氯化铵）；空气-乙炔火焰中Mo、W及过渡元素等的干扰，随火焰状态和测定位置而变化。如采用贫燃焰干扰虽可减小，但灵敏度大大降低。在试样和标样中加2%的氯化铵或氟化氢铵，或改用氧化亚氮-乙炔火焰，可减少干扰 氧化亚氮-乙炔火焰可减小或消除空气-乙炔焰中所存在的干扰 磷酸根的干扰，可用2.75%的钙盐消除
Cs	852.1 894.5 455.5 459.3	1.4	EDL	空气-乙炔（氧化焰，贫燃，蓝）	0.15~0.22 0.2 12~25 23~34	0.005	1~10	电离干扰显著	加入大量碱金属，抑制电离化 大量其他碱金属的干扰，可用调节标准溶液的碱金属与样品溶液一致的办法进行抑制 在852.1nm波长的谱线测定时，要注意检测器的灵敏度是否够用，由于单色器的杂散光可能使工作曲线弯曲，用配有火焰的灵敏度较高
Cu	324.8 327.4 217.9 216.5	0.7	HCL	空气-乙炔（氧化焰，贫燃，蓝）	0.03~0.05 0.1~0.2 0.3 0.4	0.002	5	大量存在阴离子干扰	用APDC和MIBK萃取可在较广pH范围内进行，但有大量铁等共存时，为了除去它们，必须选择最适宜的pH，以柠檬酸存在，使之和有机溶剂的分离，不易进行 根据溶液的pH不同，可能沉淀生成而出现吸光度变化，所以要保持一定的酸度 高灵敏度测定采用324.8nm，低灵敏度测定采用249.2nm的谱线为宜 Fe324.73会干扰Cu 324.75nm，使吸收增加 如用含Fe、Ni的多元素灯，应注意将狭缝减小，使其不致干扰Cu324.7nm
Cu	218.2 222.6 249.2 244.2 224.4				0.47~0.6 1.1~1.5 5.0~6.8 13.9~14.6 15.7~24				
Dy	421.2 404.6 418.7 419.5 416.8 410.3	0.2	HCL	N₂O-乙炔（还原焰，富燃，红）	0.6 0.7~0.8 0.7~1.0 1.3~1.7 5.1~7.3 15	0.03	50	存在离子化干扰，磷酸、硫酸有干扰	抑制离子化添加碱金属是必要的 高浓度时，应采用离子交换用80%的乙醇溶出物的部分洗液中，灵敏度要提高 用氧化亚氮-乙炔火焰并于乙醇溶液中进行测定时，选择404.60nm的谱线进行分析为宜

元素	λ/nm	狭缝宽度/cm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Dy	422.5				0.9				
	421.6				38.0				
Er	400.8	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	0.4~0.7	0.05	40	存在离子化干扰	
	386.3				1.0				
	415.1				1.0~1.2				
	389.3				2.0~2.3				
	393.7				2.0~3.0				
	381.0				3.0				
	408.8				3.4~5.0				
	393.5				8.0~15.0				
	394.4				9.0				
	460.7				10.0				
	402.1				20.0~22.0				
Fe	248.3	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.04~0.1	0.004	5	极化学量组成火焰时，阴离子和化学干扰几乎没有，但硅酸、磷的干扰还存在 用贫燃火焰时，化学干扰严重 血清铁的分析，除蛋白外，须除去其干扰	APDC-甲基异丁基酮萃取在pH0.5以上进行为宜，也可以用DDTC代替APDC 用铜铁试剂-甲基异丁基酮萃取，灵敏度比APDC-甲基异丁基酮提高约2倍 用聚氨酯泡沫的铁络合物进行分析，但与完全溶解剂比较，吸光度要低20% 溶液的酸度低时，溶液的分配比引起吸光度的变化，务必要加注意 若添加50%异丙醇，灵敏度可提高20倍 硅的干扰可加入EDTA来抑制 为了抑制干扰，添加铜、钙及螯合剂，对血清铁测定无效，但用抗坏血酸的火焰时，有利于消除干扰 铁的邻近线: 248.3nm有248.8nm 248.3nm有246.3nm 250.1nm有252.1nm 271.9nm有272.1nm 296.1nm有296.5nm 298.4nm有298.5nm 302.1nm有302.0nm 302.4nm 344.1nm有344.4nm 波长确定后，应注意狭缝宽度的选择，特别是常用的248.3nm共振线的狭缝宽度选择是分析中的一项大事
	248.8				0.07~0.13				
	271.9				0.13~0.34				
	302.1				0.15~0.4				
	252.7				0.18~0.31				
	372.0				0.4				
	373.7				0.4~0.8				
	344.1				0.6~1.5				
	386.0				5.6				
	305.9				0.9~2.1				
	361.6				4.4~10.0				
	392.0				11.0~18.0				

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	线性范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Fe									以248.3nm测定含钴的样品时，应注意含钴的多元素灯可能发生的干扰，可采用次灵敏线248.8nm或371.9nm 当样品中有镍时，在371.9nm会与Ni371.5nm造成吸光度增高 最灵敏线Fe248.3nm背景较大，宜选用较小狭缝
Ga	287.4 294.4 417.2 403.3 250.0 245.0 272.0	0.7	HCL	N₂O-乙炔(还原焰，富燃，红)或空气-乙炔	0.4~1.3 1.1~1.3 1.5~1.8 2.9 9.7~12.2 12.0~13.0 23~25.0	0.1	60	共存在7000mg·L⁻¹以下的阴离子没有明显的干扰 Mg、Cu、Zn等阳离子几乎没有干扰，但Al有干扰	APDC-甲基异丁基酮萃取，在pH4时是可能的 为了防止自吸，有必要使用低的灯电流 首先在空气-乙炔火焰中调整最合适的燃烧器位置 原子吸收分析以选择287.4nm为最合适 当乙炔钢瓶的压力低到7kg·cm⁻²时，灵敏度有显著降低
Gd	368.4 378.3 407.9 405.8 405.4 371.4 367.4 404.5 419.1 394.6	0.2	HCL	N₂O-乙炔(还原焰，富燃，红)	13.0~28.0 15.0 13.0~19.5 22.0 15.0~25 20.0~28 24.0~47 37.5~47 60.0 79.0	3.3	1000	有离子化干扰 化学干扰一般较小	抑制离子化，添加碱金属盐为好 并使用乙醇溶液，灵敏度将有提高 368.4nm共振线最为合适，由于火焰发光的干扰，有必要通过实验条件选择其他吸收线
Ge	265.1 271.0 259.2 275.5 269.1 303.9	0.2	HCL	N₂O-乙炔(还原焰，富燃，红)	0.8~2.2 1.5~5.0 1.5~5.0 2.1~5.1 3.0~8.6 15.0~170.0	0.15	100	在N₂O-乙炔火焰中，化学干扰几乎没有	样品用硫酸、硝酸或王水溶解，在卤素存在时，避免使Ge挥发损失
Hf	307.3 286.6 295.5 294.1 289.8 368.2 377.8	0.2	HCL	N₂O-乙炔(还原焰，富燃，红)	14~15 7.5~11 10.0 14 20.0~23 22.0~33 105.0	2.0	1250	大多数的元素干扰Hf的吸收，硫酸、碱金属和碱土金属抑制Hf的吸收 Fe、F有增感作用	若使用0.2%铁、4%HF溶液，灵敏度提高 307.3nm共振线在原子吸收分析最为适合

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限/(μg·L⁻¹)	线性范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定工作注意事项
Hg	253.7	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化性，贫燃，蓝)	2.5~4.8	0.98	250	大量的钴存在会在253.65nm吸收线上成为强烈光谱的重叠吸收信号；CN⁻、I⁻、SCN⁻、Au^{3+}、Se^{4+}、Te^{4+}、Sn^{2+}、Cr^{6+}有干扰 还原气化法Se、Te、Au、碘化物、盐酸有干扰	样品中有机物、氯化亚锡等还原剂的存在，使Hg²⁺还原为Hg，因Hg^{2+}及Hg都比Hg^{2+}[illegible]，会出现[illegible]现象，可用[illegible]系列标准溶液与样品溶液[illegible]量[illegible]加以抑制 最宜采用冷原子吸收光谱法测定 在还原气化法中应避免[illegible]
Ho	410.4 407.4 415.3 417.3 404.1 410.9 412.7 422.7 413.6 425.4	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原性，富燃，红)	0.56~2.85 0.9 1.3~1.4 1.3~7.1 3.5~7.2 6.0~14.0 8.0~15.0 16.0~23.0 23.0~43.0 57.0~65.0	0.11	50	有离子化干扰，化学干扰较小	添加大量碱金属可抑制离子化 原子化条件与分析结果关系不大
In	303.9 325.6 410.5 451.1 256.0 271.0 275.1	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化性，贫燃，蓝)	0.18~0.70 0.2~0.8 0.5~2.5 2.6~7.5 3.0~9.1 4.0~12.0 5.0~21.0	0.7	15	阳、阴离子都有干扰，例如0.5%磷酸盐、硫酸盐、1000mg·L⁻¹的Al、Mg等共存时，吸光度减少约5%	萃取技术： APDC-甲基异丁基酮萃取，在pH=2~10定量 8-羟基喹啉/MIBK，螯合剂/MIBK 303.9nm、325.6nm吸收线灵敏度相近，根据实验条件来选择 使用[illegible]时，[illegible]在工作中[illegible]，[illegible]乙炔钢瓶压力不能低于2kg·cm⁻²，否则导致信号的灵敏度[illegible]
Ir	208.8 264.0 266.5 237.3 285.0 250.3 254.4 254.4	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化性，贫燃，蓝)	1.5 5.5~15.0 6.5~13.0 6.5~15.0 7.5~18.0 8.7~22.0 10.0~25.0 15.0~91.0	0.65	100	在空气-乙炔火焰中，铝、铜、镍、铂、铅、钠都能使吸收增加50%以上	加入含1%铜和0.5%钠可消除Al、Ca、Cr、Co、Cu、Au、Fe、Pb、Mg、Mn、Ni、Pd、Pt、Sr、Ti、V、Zn的干扰。0.1%氯化镧有同样效果 208.8nm吸收线附近有三条谱线的干扰，Ir 208.4nm、Ir 209.2nm、Ir 208.5nm，它们与208.88nm很近，通常不能分离，但Ir 209.2nm吸收很小，Ir 208.6nm和Ir 208.5nm不表现吸收，故校准曲线的弯曲很小

续表

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
K	766.5 769.9 404.4	1.4	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.02 0.06~0.06 7.5~7.8	0.002	2	有离子化干扰,没有阴、阳离子的干扰	添加离子化电位低的碱金属,根据情况添加大量钠也可以 由于燃烧气体的组成,离子化程度也发生变化,最好是溶液的钠浓度保持一定 热阴极放电灯,由于自吸大,灯电流要小
La	550.1 418.7 495.0 403.7 357.4 365.0 392.0	0.4	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	27~48 35.0~53.6 47.0~72 50.0~170.0 130.0~210.0 200.0~230.0 230.0	3.0	2500	有电离化干扰,化学干扰一般较小	添加碱金属可抑制离子化 可用离子线(408.7nm)代替原子线 357.4nm共振线受火焰中CN带干扰,一般不使用还原焰,用392.7nm、550.1nm良好,后者有550.2nm邻近线
Li	670.8 323.4 610.4	0.5	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.02~0.04 9~15 150	0.0008	5	有离子化干扰,阴、阳离子干扰一般较小	由于样品的不同,添加碱金属盐是必要的 使用低温火焰,灵敏度较高 因以$Sr(OH)_2$吸收在670.7nm处有吸收光度,故系列标准溶液必须与样品具有同等浓度的锶
Lu	336.0 337.2 337.7 356.8 298.9 451.8	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	6.3 1.0 12.0 13.0 55.0 55.0	5.0	500	有离子化干扰;化学干扰一般是小的	抑制离子化,有必要添加碱金属 331.2、335.9nm吸收线的选择要依实验条件确定
Mg	285.2 202.6 279.55 280.27	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.003~0.008 0.08~0.19	0.0003	0.5	阴、阳离子干扰不明显,但低温火焰中干扰明显 空气-乙炔火焰Al、Ti、Si、磷酸、硫酸有干扰,有含氧酸共存时,干扰增大	酸度低时,吸光度变化,应在一定酸度下进行测定;通常使用空气-乙炔火焰,用氧化亚氮-乙炔火焰以消除钙的干扰,校正时,可添加碱金属,以抑制离子化 把离子线作为吸收线时,阴离子的干扰大 8-羟基喹啉-甲基异丁基酮萃取,加氰化钠可提高萃取率,pH是[illegible] 对空气-丙烷火焰应注意燃烧气体的组成比 测定时添加异丙醇可消除某些阴离子的干扰

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Mn	279.5	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.02~0.05	0.05	2	Mo、钨酸、硅等阴阴离子有干扰，稀释是硅的干扰较大，碱金属、碱土金属的干扰较小	硅对锰的干扰，可加0.2%氯化钙减小，必须使标准与试样溶液中所含硅浓度一致 采用Mn403.3nm谱线，应注意样品中存在Ga时受Ga403.298nm吸收线的干扰 萃取技术： APDC/MIBK，pH=3~7；8-羟基喹啉/MIBK，pH6.5，H_2SO_4 随着火焰的宽度，燃烧器的高度而干扰程度有所不同，使用贫燃火焰为好 在280.0nm附近有3条邻近的共振线，要减少狭缝选出吸收线 使用403.0nm附近的几条线时，碱土金属的氧化物、氢化物发生带，使S/N变坏
	279.8				0.03~0.067				
	280.1				0.04~0.15				
	403.1				0.4~0.51				
	321.7				53.2				
Mo	313.3	0.7	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	0.2~0.67	0.03	60	Al、阴离子和有机物的干扰明显	可用2%氯化铵或0.5%氯化铝抑制Ca、Mg、Fe、Sr和SO_4^{2-}等离子的干扰，但当硫酸盐或磷酸盐与钙共存引起干扰时，氯化铵不能抑制，只有添加铝离子才能抑制，添加氯化铵可抑制锰、铁的干扰，空气-乙炔焰、钙和铁只产生轻微干扰 萃取技术： APDC/MIBK，pH2 319.4nm共振线有320.5、319.5nm邻近线；390.3nm有390.2nm邻近线 乙炔钢瓶压力低于7kg·cm⁻²时吸收降低
	317.0				2.1~3.0				
	319.4				1.4~4.9				
	379.8				3.0				
	320.9				4.0~5.4				
	386.4				5.3				
	390.3				2.0~7.2				
	315.8				3.5~6.5				
	311.2				9.0~15.0				
Na	589.0	0.4	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.003	0.0005	0.1~1.0	有离子化干扰；阳、阴离子几乎没有干扰，但在低温火焰中容易出现	添加0.1%钾离子可抑制离子化 用低温火焰，灵敏度较高 必须控制溶液的酸度或pH进行测定 高浓度钙对Na589.0nm有干扰
	589.5				0.02				
	330.2				2.0				
Nb	334.9	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	12~15	1.0	600	HF、有机物有增感作用	添加碱金属可防止离子化 若使用HF-乙醇溶液，灵敏度提高4倍 334.9nm谱线有334.5nm邻近线，405.89有405.7、405.6nm，412.3nm有412.5、412.5nm邻近线 随着实验条件不同，从334.9、358.0、405.9nm谱线中选择最合适的分析线
	334.4				15.0~16.0				
	358.0				20				
	408.0				20~26				
	405.9				21~25				
	335.8				27				
	412.4				26~34				
	357.6				45				
	353.5				47~54				
	374.0				47~57				
	415.3				91				

元素	λ/nm	光谱通带宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Nd	492.4 463.4 472.0 486.7	0.4	HCL	N_2O-乙炔(还原性,富燃,红)	5.0~6.5 9.0~11.0 7.0~18.0 35.0~50.0	1.6	400	有电离干扰；化学干扰一般较小，氟、硅、铝的干扰大	为防止电离，添加碱金属是必要的 50%醇溶液可使灵敏度提高(3~4)倍 通常溶液对于分析的分析线是492.4nm共振线 468.5nm共振线有468.4nm邻近线
Ni	232.0 231.1 341.5* 352.4 305.1 346.2 351.5 303.8 337.0 323.3 294.4 362.5 247.7	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化性,贫燃,蓝)	0.06~0.14 0.1~0.7 0.3~0.4 0.3~0.29 0.4~0.54 0.6~0.8 0.6~0.88 1.0~1.6 2.0~2.4 3.0~4.2 5.0~7.1 27 35.0	0.008	7	富燃火焰时，阴、阳离子有干扰；贫燃火焰时在较高温度下可使干扰几乎消失	镍与有邻能相近似的铁共存时，必须严格选择燃烧条件及燃烧器位置 添加50%异丙醇时，灵敏度增加约2倍 APDC-甲基异丁基酮萃取在pH3.5进行 酸度低时，引起吸光度变化，所以必须控制一定酸度进行测定 232.0nm共振线有232.1邻近线；235.7nm有235.8邻近线；234.6、234.9有234.7nm邻近线；323.3nm有323.1邻近线；339.1nm有339.3nm邻近线； 341.5nm有341.4nm邻近线
Os	290.9 263.7 305.9 301.8 330.2 271.5 280.7 264.4 442.0 426.1	0.2	HCL	N_2O-乙炔(富燃,红)	1.0 1.0~1.8 1.0~1.6 2.0~3.2 2.0~3.6 3.0~4.2 3.0~4.0 3.0~4.8 13.0~19.0 20.0~30.0	0.2	10~75	在氧化炉中和存在过氧化物时，Os的信号被抑制，这是由于形成OsO_4	可使用硫脲-有机溶剂 在301.8nm共振线有301.8nm的邻近线，305.9nm有306.02nm的邻近线
P	213.6 214.9	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原性，富燃，红)	250~290 450~500	20	10000	在N_2O-乙炔火焰中无干扰	大部分的含磷样品溶于酸中直接用稀释

续表

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限/(mg·L⁻¹)	线性范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Pb	217.0 283.3 261.4* 202.2 368.4 205.3 364.0	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.1~0.4 0.2~0.5 3.5~11.0 5.0~7.7 6.0~27.0 5.4~34.0 67	0.03	20	阳、阴离子几乎不干扰，但用空气-丙烷低温火焰时，阴离子、钙、镁等有干扰 具有最高的灵敏度	APDC-甲基异丁基酮萃取 pH=1.7~4.5 汽油中铅的测定，要求用空心阴极灯 通常贫焰，空气-乙炔火焰适用于分析 酸浓度高时，出现异常现象（吸光度减少），所以必须在低酸度下进行测定 217.0nm 和 283.3nm 共振线都能被采用，灵敏度不同，灵敏度 Pb 283.3nm 具有好的信噪比和小的背景干扰优于 Pb 217.0nm，后者适用于痕量分析 使用含铜的多元素灯时，Cu 216.5nm 会影响 217.0nm 的测定，这时应当用 283.3nm
Pd	247.6 244.8 276.3 340.5*	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰、贫燃，蓝)	0.11	0.02	2.0~15.0	盐酸、硝酸极少许干扰，硫酸干扰较大，乙酸具有抑制增强，贵金属和钠几乎无干扰	配制系列溶液与样品溶液的酸度一致，以避免无机酸的干扰 过渡金属的干扰，可用添加 0.5%镧，或 0.01mol·L⁻¹ 的 EDTA 消除 244.8nm 和 247.6nm、276.3nm 和 340.4nm 依浓度来选择 随着助燃气体的加热灵敏度增加 富焰火焰可得到高灵敏度，火焰中的测定位置也影响灵敏度
Pr	491.4 495.1 504.5 513.3		HCL	N_2O-乙炔(富燃)	15 13 42 23	10		离子化干扰显著	添加碱金属可抑制离子化
Pt	265.9 214.4 244.0 246.7 248.7 264.7 267.7 270.2* 270.6* 283.0 293.0 306.5			空气-乙炔 空气-丙烷	2.2 2.3 130 25 11 11 22 9.5 9.7 7.4 6.2 4.5	0.015		有贵金属干扰，特别是低温火焰时，干扰显著，硫酸干扰较大	添加 1%镧能抑制阳离子（贵金属）的干扰 若使用贫燃火焰，干扰可减小 大量的 Ba, Ca, Cr, Fe, Pb, Mg, Ni, Pd, Ru, Rh, Sr, Zn 等降低 Pt 的灵敏度，可通过 1%钠-二氯铜进行抑制 由于灵敏度随燃烧气体的高度变化较大，必须从贫燃到富燃之间选择最合适的条件

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Rb	780.0 794.8 420.2 421.6	1.4	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.04 2.1~6.2 3.0~8.7 9.0~15.0	0.005	1~10	离子化干扰很严重,阴离子的化学干扰不明显	抑制离子化,有必要添加碱金属(钾到铯) 由于空气-乙炔火焰中离子化程度大,灵敏度只有空气-丙烷火焰的1/2 抑制铯的干扰,酸的影响方面,若采用0.2mol·L⁻¹ HCl,其他的酸影响几乎没有
Re	346.0 242.9 345.2 346.5			氧化亚氮-乙炔(富燃) 氧-乙炔(富燃)	12 35 20			Al、Mn、Ca的干扰较大,其次是铁、钒、镍、钾、钼干扰较小	添加50%乙醇,灵敏度增加2倍 干扰与燃烧器的类型有关及与火焰高度有关,高度不同,灵敏度有显著变化 共振线242.9nm有242.6、243.0nm邻近线;345.8nm有345.9nm邻近线;346.0nm有345.9nm邻近线
Rh	343.5 369.1 339.7 350.2 365.8* 370.1 350.7 328.1	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.2 0.5 0.5 0.7 0.9~1.0 2.0 9.0 6.5~15.0	0.01	2.0~20.0	盐酸、磷酸、硫酸有干扰,特别是硫酸的干扰较大 共存的碱金属在低浓度时有增感作用,高浓度时灵敏度减小	加1%硫酸钠消除阴阳离子的干扰 溶液中加1%硫酸钠1000mg·L⁻¹时Al、Bi、Ca、Cd、Cu、Cr、Fe、Mg、Mn、Mo、Ni、Ti、V、Zn不干扰 灵敏度随燃烧气体的组成而变化 必须从贫燃到富燃之间选择最适合条件
Ru	349.9 372.8 379.9 392.5	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.8 0.88~1.9 1.6~1.8 7.5~9.5	0.2	20~50	Pt、Rh的存在产生增感	加入0.5%硫酸铜或硫酸镉于样品溶液和系列溶液中的办法抑制Pt、Rh的干扰 萃取技术: APDC/MIBK,pH=2~10 共振线372.8nm有372.7nm邻近线,379.9nm有379.8nm邻近线
Sb	217.6 206.8 231.2 212.7	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.2~0.55 0.35~0.87 0.4~1.3 1.5~12.0	0.02		阳离子干扰几乎没有,但铜有增感作用 盐酸、硝酸有化学干扰,特别是硫酸较大	APDC-甲基异丁基酮萃取在pH=3.5~4最为适宜 控制一定酸度测定很重要,因增加酸度会降低灵敏度 以217.6nm作为原子吸收分析线最适宜,当Cu、Pb共存时,231.2nm共振线适宜分析 富燃空气-乙炔火焰可以提高灵敏度,但噪声也增加

续表

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	线性范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Sc	391.2	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	0.1~0.2	0.05	25	—	—
	390.8				0.1~0.3				
	402.4*				0.1~0.4				
	402.0				0.2~0.4				
	405.5				0.3				
	327.0				0.3				
	408.2*				0.7~2.1				
	327.4*				1.0				
	326.9				2.0				
Se	196.0	2.0	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.50	0.15	50	—	最好使用还原气化法和氢火焰联合测定 使用Se Cu灯时,203.9nm有铜的谱线,铜中硒的分析应注意此点
	204.0				3.0~6.0				
	206.3				12.0~22.0				
	207.5				40.0~75.0				
Si	251.6	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	0.8~2.0	0.08	150	铜、钙、铁、钠等呈现增感效果	共存钠的浓度,最好保持一定
	250.7*				2.0~4.0				
	252.8				2.0~6.0				
	251.9*				3.0				
	251.4				3.0				
	252.4*				3.2~7.0				
	221.7*				3.3~7.5				
	221.1*				6.0~14.0				
	221.7				7.5				
	288.2				10.0~37.0				
	220.8				24.0				
Sm	429.7*			N_2O-乙炔(富燃-乙炔)	15	3		离子化干扰显著,化学干扰一般较小	添加碱金属可抑制离子化 随着燃烧气体组成和火焰温度不同而吸光度变化,因此要注意调节气体组成
	472.8*				50				
	476.0*				45				
	478.4*				60				
	468.4*				55				
	520.1*				25				
	528.3*				50				

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限度/(mg·L⁻¹)	线性范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Sn	235.5	0.4	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	1.2	0.03	100	用空气-氢火焰时，硝酸、硫酸及阴离子有干扰，但盐酸、磷酸几乎无干扰；用空气-乙炔火焰时，阴离子干扰减小，但存在某些浓度的阳离子干扰，如用前者火焰时Na(减感)、Cu,Pb,Zn,Ni(增感)表现干扰，后者火焰则无干扰	使用空气-氢火焰，灵敏度比其他火焰高，但干扰也大 氧化亚氮-乙炔火焰中没有干扰，但灵敏度低，为此必须根据不同目的，选择火焰 空气-氢火焰以224.6nm来共振线，空气-乙炔火焰以286.3nm共振线最适合 燃烧器种类不同，灵敏度和干扰变化较大。 燃烧气体的组成、燃烧器的高度对灵敏度也有较大的影响
	235.4*				1.2~3.2				
	286.3				1.4~3.2				
	270.6				2.0~4.0				
	303.4				3.0~6.0				
	219.9				4.0~7.3				
	254.7				4.0~9.4				
	242.5				5.0~9.2				
	300.9				5.0~9.2				
	380.1				22.0~45.5				
Sr	460.7	0.4	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	0.1	0.004	5	阳、阴离子的化学干扰显著，有离子化干扰，和其他元素不同的是，磷酸干扰比盐酸、硫酸大	由于燃烧气体组成不同，离子化干扰程度也不同，为此，气体组成要经常保持一定，或者添加必要的碱金属 火焰中部的发光较强，使测定信号的噪声变高，因此仅限于在低浓度范围，或提高光源放电电流
	407.8*				2.0				
Ta	271.5	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	10	1	1000	有阳、阴离子干扰 氟化氢、有机溶剂具增感作用	要求在溶液里保持溶解离子状态的钽与还原剂的合适共存后测定 HF-甲醇(25%)溶剂，灵敏度增加3倍 277.6nm上重叠有277.5nm的谱线
	260.8				20.5				
	250.9				20.5~23.0				
	277.6				24.0				
	255.7				24.5~29.0				
	293.4				24.0				
	256.9				24.0~30.0				
	253.5				26.0~32.0				
	299.8				26.0~32.0				
	275.8				30.0~38.0				
Tb	432.6	7		N_2O-乙炔(富燃,红色)	2	2		有离子化干扰，化学干扰一般较小	添加碱金属可抑制离子化干扰
	431.9				6				
	433.8				16				

元素	λ/nm	光谱通带/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(μg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳浓度/(μg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Tc	261.4 260.9 429.7 426.2 318.2 423.8 363.6 317.3 346.6 403.2	0.2	HCL	空气-乙炔(还原焰,富燃,黄)	100.0 13.0 20.0 24.0 30.0 33.0 33.0 300.0 300.0 300.0		1000		
Te	214.3 225.9 238.6*	0.4	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.2~0.4 3.0~4.0 18.0~25.0	0.02	25.0	高浓度的Cu、Ni、Zn、Cd呈现干扰	可以DDTC甲基异丁基酮萃取 使用Te-Cd灯时碲的谱线成为碲的邻近线，而且这个邻近线表现明显吸收，所以在试样中共存镉时，必须加以注意 因吸收大，要使用低电流 燃烧气体的组成在广泛范围内可能使用，但接近贫燃焰较好
Th	324.1			N_2O-乙炔	181				可用钼酸铵作间接测定 pH=4~6，APD/MIBK萃取
Ti	364.3* 365.4 320.2 363.5 335.5* 375.3 334.2 319.9* 399.9 399.0 395.8 394.8 337.2	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	1.0 1.5~2.0 2.0 2.0~2.4 2.1~2.6 2.4 2.4~2.6 2.6 2.4~3.0 4.0 4.3 7.9 9.0~15.0	0.05	200	F⁻、Fe、Al等有干扰	用于除掉HF、大量的铁可使吸光度亢进，在加了铁的溶液中的钛有钴、镍、铬等的干扰 要想高灵敏度，可用50%乙醇溶液或1mol·L⁻¹HF-乙醇90%的溶液 374.2nm离子线是374.1nm吸收线的邻近线 原子吸收分析用364.3nm为最好

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限/(mg·L⁻¹)	最佳浓度/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
Tl	276.8 377.6 238.0 258.0	0.7	HCL	空气-乙炔(氧化焰,贫燃,蓝)	0.1~0.6 0.3~1.5 3.0~4.0 10.0~13.0	0.02	40	共存的酸全部,碱土金属,Pb,Zn,Ni,Mg,Zr,Cd,Hg,Mn,Ag,Se,Al,Cr,SO_4^{2-},PO_4^{3-},NO_3^-,在100 mg·L⁻¹以下有干扰	DDTC-甲基异丁基甲酮萃取是可能的 APDC/MIBK,pH=2~12
Tm	371.8 410.6 374.4 409.4 418.8 420.4 375.2 436.0 341.0 530.7	0.4	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	0.3~0.45 0.4~0.7 0.5~0.74 0.5~0.6 0.8 0.9~1.5 2.0 3.0~4.0 4.0 6.0~15.0	0.03	20	有离子化干扰	抑制离子化,有必要添加碱金属 若使用乙醇溶液可提高灵敏度
U	358.5 348.9 351.5 356.7* 358.0* 351.8 394.4 404.1* 415.4			N_2O-乙炔(富燃,红色)	100 200 250 150 100 350 350 500			有离子化干扰	添加碱金属可抑制离子化,萃取技术: APDC/MIBK,pH=3~4 用磷酸三丁酯在CCl_4中萃取 离子线355.1nm也有可能用来吸收测定 离子线成为邻近线,即348.86nm离子线是348.84nm共振线的邻近线;351.36nm是351.20nm的邻近线;394.26nm、394.41nm及394.38nm的邻近线;415.34nm是415.40的邻近线 358.5nm的邻近线适合于原子吸收分析
V	318.4 306.6 306.5	0.7	HCL	N_2O-乙炔(还原焰,富燃,红)	0.6~2.0 5.0~5.0 5.0~5.0	0.04	100	磷酸、乙酸有机物等碱金属及Fe^{3+}、Cr^{3+}、Ti^{4+}、Al^{3+}、Ti^{4+}有干扰 具有机溶剂增感	用铜铁试剂甲基异丁基甲酮萃取是可能的,并在添加钠时抑制离子干扰,且使灵敏度增加2倍。若有其他共存物时,必须加入过量的铜铁试剂 (318.2~318.5)nm共振线适用于原子吸收分析 在N_2O乙炔火焰中发射能力强的话,选择火焰的部分在306.6nm共振线
V	305.6 438.0 437.9 476.5 320.2 390.2				4.0~6.0 6.0 8.0 8.4 5.0~13.0 8.0~15.0				加入过量的铝可抑制共存离子的干扰 添加6%乙二醇、乙酸乙酯或铝,可使灵敏度增加2倍 可根据试样用的是有机溶液或水溶液来选择燃烧器 306.6离子线,在370.4nm有370.5,370.0nm原子线,在437.9nm有438.0nm邻近线

续表

元素	λ/nm	狭缝宽度/nm	光源	火焰种类	灵敏度/(mg·L⁻¹)	检出限量/(mg·L⁻¹)	最佳范围/(mg·L⁻¹)	干扰	测定上应注意的事项
W	255.1 294.4 268.1 272.4 254.7 283.1 430.2 289.6 287.0 400.9 407.4	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰，富燃，红)	5.5~10.0 6.0~13.6 7.0~12.0 7.0~11.0 8.5~15.0 10.0~21.0 10.0 12.5~25.0 17.0~38.0 19.0~20.0 40.0	1.0	500	—	255.1nm 共振线灵敏度较高，但从稳定性(较明显的正向线，有线性)和(S/N)来看，430.2nm 共振线适合于分析 ( )中的谱线，通常单色仪不能分开，且与吸收无关的谱线 全部谱线在0.5nm以内有邻近线，但251.1nm,294.4nm,400.9nm共振线在0.15nm以内无邻近线
Y	410.2 407.7 412.8 414.3 362.1	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰，富燃，红)	1.6~1.8 2.0 2.5~3.0 3.0 3.0	0.5	200	—	有离子化干扰 添加碱金属可抑制离子化干扰
Yb	398.8 364.4 346.4 346.4 267.2 267.5	0.2	HCL	N_2O-乙炔(还原焰，富燃，红)	0.1 0.45 1.0~3.0 3.0 5.0~24.0 28.0	0.01	15		有离子化干扰化学干扰一般较小 添加碱金属可抑制离子的干扰
Zn	213.9 307.6	0.7	HCL		0.01 58.0~78.0	0.002	1	无阴离子大量存在干扰，但硅的干扰较大；盐酸等酸醇及硫酸、磷酸只有少许干扰	APDC 甲基异丁基酮萃取 pH=2.5~5.0 为宜 测定时样品要保持一定酸度，尤其酸度低时吸光度减少 空气-乙炔焰中 Zn213.86nm 被火焰气体强烈吸收 用 Zn-Cu 灯时，铜的 216.5、217.9、218.2nm 要注意邻近线 必须注意背景吸收、分子吸收的影响
Zr	360.1 301.2 303.0 298.5 354.8 362.4 352.0 468.8	0.2	HCL	空气-乙炔(氧化焰，贫燃，蓝)	7~10 11.0 13.0~15.0 13.0 15.0 17.0~19.0 22.0 75.0	1.4	500	有离子化干扰氢氟酸、盐酸、铁有干扰	由于添加 HF、HCl、铁、乙醇、丙酮可使吸光度增加 最好使用 1mol·L⁻¹ HF-乙醇(90%)溶液 为抑制离子化，可添加碱金属 注意邻近线： 301.2 有 301.3nm 线 303.0 有 302.8nm 线 354.8 有 355.0nm 线 360.1 有 360.0nm 线

表8-3 无火焰原子吸收光谱法元素的测定条件

元素	λ/nm	通带宽/nm	W，P①	原子化方式	最佳灰化温度/℃	最佳原子化温度/℃	不同气流流速时灵敏度/pg（1%吸收）		灵敏度检出/(mg·L⁻¹)	石墨管	备注
							50ml·min⁻¹	300ml·min⁻¹			
Ag	328.1	0.7	W	常规	500	2500	6.6	2.7	0.017	未涂层的	很多氯化物对Ag的测定有干扰，Na、K和Al的氯化物浓度高达1g·L⁻¹对Ag测定无干扰；Ca、Mg、Fe、Co、Cu和Ni的氯化物对Ag的干扰较为明显；Cu、Mg和Fe的硝酸盐对Ag无干扰，Co、Cs和Ni的硝酸盐干扰较为明显；当有$MgCl_2$和$AlCl_3$存在时，灰化过程损失是由于$AlCl_3$和$MgCl_2$挥发夹带所致 基体改进剂：200μg PO_4^{3-}
				最大功率	500	1300	6.6	3.6	0.023		
				常规	500	2200	5.9	2.2	0.012	热解涂层的	
				最大功率	500	900	6.5	3.4	0.014		
			P		650	1600	-	-	—	-	
Al	309.3	0.7	W	常规	1500	2700	40	54	0.093	未涂层的	用石墨炉测定铝不能用氮气，否则会生成稳定的一氮化物，若用塞曼AAS则须可采用波长309.3nm，在测定时应注意石墨管的老化效应；采用横向加热石墨炉时，必须选用高质量热解石墨；报道过CaCl、$CoCl_2$、$HClO_4$等有干扰，$MgCl_2$对信号有抑制作用，加入0.1%Ca（硝酸盐）或0.3%Ca（磷酸盐）会增加Al的信号；在测定时防止污染特别重要，因铝在环境中无处不在 基体改进剂：50μg $Mg(NO_3)_2$
				最大功率	1500	2600	24	24	0.055		
				常规	1500	2700	40	16	0.12	热解涂层的	
				最大功率	1500	2400	40	13	0.10		
			P	—	1730	2400		-	—	-	
As	193.7	0.7	W	常规	900	2700	49	24	0.12	未涂层的	砷以氢化物形式吸收到铂溶液中，然后用石墨炉AAS测定，灵敏度很好；砷原子化适宜温度为1300℃，当灰化温度高于450℃时，灰化时间延长砷的损失严重，用Ni作基体改进剂，用Pd比Ni效果更好，当样品溶液中Al多于100mg·L⁻¹时，会对砷的分析线193.7nm产生无法校正的光谱干扰，此时可采用197.2nm，用塞曼效应校正背景可消除Al对砷193.7nm干扰，磷酸盐形成P_2产生背景干扰亦可用塞曼效应校正
				最大功率	900	2100	40	15	0.13		
				常规	500	2700	49	19	0.11	热解涂层的	
				最大功率	300	1900	46	16	0.13		
			P		1500	2500	-	-	—	—	
Au	242.8	0.7	W	常规	600	2700	31	14	0.080	未涂层的	用242.8nm分析线时，10μg的Co产生干扰，使用塞曼效应背景校正可以消除；20mg·L⁻¹K几乎抑制全部Au的信号，2000mg·L⁻¹Ca和4mg·L⁻¹Na使金的吸收值分别降到33%和70%以下 50μg Ni可作基体改进剂
				最大功率	600	2000	27	17	0.07		
				常规	600	2150	22	11	0.057	热解涂层的	
				最大功率	600	1600	24	11	0.055		
			P	—	1000	2200	—	—	—	—	
B	249.7	0.7	W	常规	1000	2700	1760		2.7	热解涂层的	石墨炉AAS法测硼的灵敏度不高，为防止在较低温度时就发生硼（以氧化硼形式）丢失，需加入钙作基体改进剂 采用2550℃原子化B，可获良好的原子信号
				最大功率	1000	2700	576		1.0		
Ba	553.6	0.2	W	常规	1500	2700	270	117	0.5	未涂层的	高温原子化和快速升温的热解涂层石墨管，热解石墨炉比无涂层石墨炉灵敏度提高15倍，为减少来自管壁的连续辐射，使用窄的光谱狭缝和高强度空心阴极灯；氘灯背景校正都不适于此时背景校正，可采用自吸收或塞曼效应校正器
				最大功率	1500	2700	172	32	0.29		
				常规	1500	2700	44	22	0.15	热解涂层的	
				最大功率	1500	2400	35	22	0.097		
Be	234.9	0.7	W	常规	1000	2700	3.5	5.3	0.0085	未涂层的	用能形成稳定碳化物的金属处理石墨管，使Be生成难电离碳化物，Ca和Al可作为Be的有效基体改进剂，用$Mg(NO_3)_2$作Be的基体改进剂，可在很高的温度下灰化而无Be的损失
				最大功率	1000	2000	1.1	0.7	0.0028		
			P	—	1500	2500	—	-	—	—	

元素	λ/nm	通带宽/nm	W、P*	原子化方式	最佳灰化温度/℃	最佳原子化温度/℃	不同气流速度时灵敏度/pg（1%吸收） 50mL·min⁻¹	0mL·min⁻¹	灵敏度检出/(mg·L⁻¹)	石墨管	备注
Bi	223.1	0.2	W	常规	400	2300	38	13	0.1	未涂层的	由于部分氧化物挥发而降低原子化，灰化升高改变信号峰；在灰化阶段通O_2则可提高灵敏度；用223.1nm线测Bi时20μg的Cu和Co有干扰，采用塞曼背景校正器时可消除 Ni是有效基体改进剂（20μg），灰化温度可提高到1200℃
				最大功率	400	1100	29	13	0.1		
				常规	500	2100	28	12	0.11	热解涂层的	
				最大功率	500	1600	61	20	0.15		
			P	—	900	1900	—	—	—	—	
Ca	422.7	0.7	W	常规	1200	2700	16	11	0.035	未涂层的	通常不用石墨炉AAS测定，因为外部污染很难避免。热解涂层石墨管使Ca精密度不佳，测定盐水中Ca可用5% HNO_3作基体改进剂
				最大功率	1200	2600	8.9	5.9	0.021		
				常规	1200	2700	1.5	5.3	0.0047	热解涂层的	
				最大功率	1200	2400	2.2	1.6	0.0049		
Cd	228.8	0.7	W	常规	250	2100	1.5	0.5	0.0036	未涂层的	若使用涂上能生成碳化物的金属，可延长管的使用寿命，加Zr、Nb、Ta、Mo、W的盐可提高灰化温度，降低… $(NH_4)_2HPO_4$可作基体改进剂，而$(NH_4)_2SO_4$可使灰化温度提高至600℃，用Mo炉测Cd时磷酸作基体改进剂效果好，将平台技术与磷酸盐基体改进技术结合和应用塞曼背景校正技术使测定可靠性提高
				最大功率	250	800	1.5	0.6	0.0042		
				常规	250	1700	1.5	0.5	0.0041	热解涂层的	
				最大功率	250	800	2.4	0.5	0.0034		
			P	—	900	1600	—	—		—	
Co	240.7	0.2	W	常规	1000	2700	59	31	0.17	未涂层的	通常采用240.7nm分析线，但次灵敏线242.5nm的灵敏度仅低20%，而信噪比和线性关系可能更好，用L'VOV平台，积分A·S信号，采用热解涂层石墨管和$Mg(NO_3)_2$基体改进剂测定Co结果是好的，Cu、Mg和Ni的氯化物和Ni的硝酸盐有干扰
				最大功率	1000	2500	46	31	0.12		
				常规	1000	2400	25	16	0.077	热解涂层的	
				最大功率	1000	2300	21	17	0.025		
			P	—	1400	2400	—	—	—	—	
Cr	357.9	0.7	W	常规	1200	2700	30	14	0.046	未涂层的	用石墨炉AAS测Cr是较困难的，背景较难校正，因D_2灯在Cr共振线357.9nm处的强度不够，可使用钨灯校正背景；用热解涂层石墨管测定Cr是最适宜的，当有$HClO_4$存在时，Cr会损失，测Cr不能用N_2气作工作气体 基体改进剂50μg $Mg(NO_3)_2$
				最大功率	1200	2500	13	5.4	0.030		
				常规	1200	2700	7.0	4.0	0.016	热解涂层的	
				最大功率	1200	2300	5.5	3.1	0.014		
			P	—	1650	2600	—	—	—	—	
Cs	852.1	0.7	P		900	1900					使用无极放电灯时检测限为0.3pg·L⁻¹，仪器上须装有852.1nm背景校正器，基体复杂样品使用塞曼背景校正器，最好选用L'VOV平台，热解涂层石墨管，快速升温（最大功率加热）和积分吸光度信号，在这种条件下没有离子化干扰
Cu	324.7	0.7	W	常规	900	2700	22	20	0.063	未涂层的	Cu的分析线产生严重塞曼效应，用塞曼效应校正背景灵敏度下降，氯化物干扰Cu的测定，当改用快速升温方式，30μg NaCl不影响，NaCl对测定Cu的干扰和存在的酸有关，HNO_3、H_2SO_4、H_3PO_4使Cu的吸收信号增加，$HClO_4$、HCl使信号下降
				最大功率	900	2250	15	11	0.044		
				常规	900	2700	12	7.5	0.024	热解涂层的	
				最大功率	900	2000	15	6.2	0.020		
			P	—	1200	2300	—	—	—	—	
Dy	421.2	0.2	W	常规	1800	2700	1000	980	2.0	未涂层的	Ca、Fe和Al使Dy的信号大大增加，其他元素影响很小；热解涂层石墨管使用寿命比普通石墨管长
				最大功率	1800	2700	580	580	1.2		
				常规	1500	2700	72	54	0.15	热解涂层的	
				最大功率	1500	2700	47	38	0.11		

元素	λ/nm	通带宽/nm	W、P	原子化方式	最佳灰化温度/℃	最佳原子化温度/℃	不同气流压度时灵敏度/pg（1%吸收） 50mL·min⁻¹	3mL·min⁻¹	灵敏度检出/(mg·L⁻¹)	石墨管	备注
Eu	459.4	0.2	W	常规	2300	2700	250	162	0.5	未涂层的	通常用热解涂层管测定，避免到灯影因素的干扰，如氯化物干扰；HNO_3溶液对Eu没有影响，而HCl影响很大
				最大功率	1300	2700	163	85	0.32		
				常规	1300	2700	28	17	0.063	热解涂层的	
				最大功率	1100	2600	24	16	0.052		
Er	400.8	0.2	W	—	1700	2700				热解涂层的	用热解涂层石墨管测定，其检测限为200pg
Fe	248.3	0.2	W	常规	1200	2700	20	13	0.045	未涂层的	用石墨炉测铁要注意环境污染；用热解涂层石墨管测铁灵敏度比普通石墨管有提高；灵敏度在很大程度上依赖于HNO_3浓度和所使用的碳化物形成元素，使用Co作内标元素，可改善分析精度
				最大功率	1250	2500	11	7.6	0.017		
				常规	1300	2400	12	6.7	0.029	热解涂层的	
				最大功率	1250	2000	13	8	0.030		
			P	—	1450	2100	—	—	—		
Ga	287.4	0.7	P	—	500	2700	—	—		—	使用石墨炉测定Ga时，HNO_3和H_2O_2的混合物能使Ga的信号增加，当…存在时会大大降低Ga的信号，用平台技术测定结果比石墨管好，若先取1%抗坏血酸注入炉内干燥后，再取样品溶液效果更好
Gd	407.9	0.2	W		1500	2720	—	—	—	—	用热解涂层石墨管测定，其检测限为32pg
Ge	265.1	0.2	P		950	2550					使用平台技术测定Ge有明显优点。GeO挥发到气相后易于损失Ge，用Na和Ca作基体改进剂时分析精度更好，亦可用50μg $Mg(NO_3)_2$作基体改进剂，加入氧化性酸能改进分析灵敏度，可加入$HClO_4$，但加入HNO_3更有效；加入0.6mol·L⁻¹ HNO_3可以消除几种氯化物干扰，使用镀Ta石墨管可减少干扰
Hg	253.6	0.7	W	常规	250	2000	565	152	1.3	未涂层的	当Hg含量很低时，通常采用冷蒸气技术。用石墨炉测Hg的关键是Hg的挥发，用Na_2S和$K_2Cr_2O_7$作基体改进剂，灰化温度达250℃，Hg不挥发
				最大功率	150	550	820	850	1.7		
			P		250	1000	—	—	—		
Ho	410.4	0.2	—	—	—						Na、Ca、Fe、Mg、Al和La使Ho的信号增大，检测限为5ng
In	303.9	0.7	W	常规	800	2400	201	55	0.43	未涂层的	用石墨炉测In，卤化物有严重干扰，当H_2SO_4与NH_4NO_3（或$HClO_4$）共存时，有干扰；但任何一种酸单独存在时不产生干扰；测In时可以用共振线303.9nm，也可用非共振线325.6nm，这两条谱线的特征量分别为7pg/0.0044A·s；用303.9nm分析线时，用D_2灯背景扣不掉，这种组分所产生的结构背景可用塞曼校正器扣除
				最大功率	800	1800	100	51	0.26		
				常规	800	1900	86	14	0.33	热解涂层的	
				最大功率	800	2100	135	86	0.51		
			P		850	1400	—	—	—		
I	264.0	0.2	W	常规	1050	2700	1960	580	2.8	未涂层的	
				最大功率	1020	2700	945	587	1.9		
				常规	1000	2700	940	275	1.0	热解涂层的	
				最大功率	1000	2550	410	270	1.0		
K	766.5	0.4	W	常规	1000	2700	4.4	2.0	0.013	未涂层的	
				最大功率	1000	1950	4.0	2.4	0.011		
				常规	350	2100	1.7	0.8	0.0065	热解涂层的	
				最大功率	350	1500	1.4	0.8	0.0058		

续表

元素	λ/nm	通带宽/nm	W, P①	原子化方式	最佳灰化温度/℃	最佳原子化温度/℃	不同气流速度时灵敏度/pg (1%吸收) 50ml·min⁻¹	5ml·min⁻¹	灵敏度检查/(mg·L⁻¹)	石墨管	备注
La	550.0	0.2	W		1500	2700		…	…	—	用热解涂层石墨管测La，明显改善灵敏度和精密度，在2900℃原子化10s，各种碱金属和碱土金属干扰很小，La的检测限为30ng
Li	670.8	0.7	W	常规	1000	2700	2[illegible]	18	0.051	未涂层的	当样品中含有0.05mol·L⁻¹ $CaCl_2$时，Li的信号被大大降低，加入等物质的量的H_2SO_4能消除$CaCl_2$干扰，加磷酸也能减少干扰，但增加背景
				最大功率	1000	2700	15	6.8	0.034		
				常规	1000	2700	3.4	2.6	0.0290	热解涂层的	
				最大功率	1000	2300	3.1	2.4	0.0280		
			P	—	900	2600	—	—	—	—	
Pb	283.3	0.7	W	常规	500	2300	37	13	0.055	未涂层的	用石墨炉AAS法分析Pb使用的灵敏线283.3nm，最灵敏线217.0nm的灵敏度高约2倍，但217.0nm分析线的能量很弱与D_2灯能量平衡，当用塞曼效应校正背景时，应采用217.0分析线。分析不同基体样品中Pb，加入基体改进剂是需要的，可采用$NH_4H_2PO_4$或$(NH_4)_2HPO_4$和磷酸盐的混合物作为基体改进剂，也有使用La_2O_3、$LaCl_3$和La作基体改进剂，当用H_2SO_4等酸消化样品时加入饱和硫酸对测Pb有利，K、Na和Al的氯化物对Pb的测定有干扰，而Ca、Co、Fe和Mg的氯化物有干扰，使用易与碳形成碳化物的金属处理过的石墨管对Pb测定是有益的
				最大功率	500	1100	37	13	0.055		
				常规	550	2100	40	13	0.11	热解涂层的	
				最大功率	550	1100	44	15	0.12		
Pd	247.6	0.2	P	—	1350	2900	—	—	—	—	热解涂层石墨管镀上Ta的碳化物可延长使用寿命，平台技术可提高灵敏度，244.8和247.6nm两条分析线灵敏度为0.7μg·L⁻¹，由于HNO_3对测Pd有一定干扰，最好选用HCl制备溶液
Pt	265.9	0.7	W	常规	1400	2700	733	440	1.6	未涂层的	HNO_3能使Pt的信号降低，最好采用HCl溶液，为减小HNO_3的影响，加入氢以驱赶消除氧
				最大功率	1400	2700	435	268	0.85		
				常规	1400	2700	551	171	0.63	热解涂层的	
				最大功率	1400	2500	275	117	0.53		
Rb	780.0	0.4	P		800	1800					用石墨炉和无极放电灯测定铷，检测限为0.02μg·L⁻¹，分析基体复杂样品，可使用塞曼背景校正器；因无极放电灯的亮度不受塞曼比限制，最好选用L'vov平台，热解涂层石墨管；最大功率加热和积分吸收信号测量方式，在此条件下无电离干扰
Rh	343.5	0.2	W		1500	2400					HNO_3对铑的测定有干扰，最好用HCl溶液；使用硫脲富集Pt系金属，测定了合金和矿物样品中Rh
Ru	349.9	0.2	W		1400	2500					采用热解涂层石墨管和L'vov平台，用萃取法把Ru萃取到有机相测定海水中Ru，检测限为45pg Ru；用硫脲富集Pt系金属，分析测定了合金和矿物中Ru
Sb	217.6	0.2	W	常规	1000	2700	59	22	0.13	未涂层的	用217.6nm分析线并采用带宽0.2nm的狭缝时，Cu和Fe对20ng Sb测定有干扰，测Sb时用Cu作基体改进剂比用Ni或Pt更好，为保持锑的3价状态，必须在样品中加入酒石酸
				最大功率	1000	2000	49	26	0.12		
				常规	1000	2500	55	20	0.13	热解涂层的	
				最大功率	1000	2000	57	27	0.15		

续表

元素	λ/nm	光谱带宽/nm	W，P①	原子化方式	最佳灰化温度/℃	最佳原子化温度/℃	不同气体流速时灵敏度/pg（1%吸收） 50ml·min⁻¹	0ml·min⁻¹	检出限/(ng·L⁻¹)	石墨管	备注
Se	196.0	2.0	W	常规	200	2700	99	40	0.23	未涂层的	使用Zr或Ta处理过的石墨管产生最大的吸光度信号；可加入Ni或La作基体改进剂，为防止Se的损失对Se的基体改进剂作了大量研究，大多采用Ni。有人建议用Cu和$Mg(NO_3)_2$的混合物，通过比较基体改进剂Li、Co、Ni、Cu和Zn，发现加Zn比Ni，吸收信号高15%，Cu不如Ni和Zn。Zn硒化物熔点为1100℃，灰化温度不超过1100℃，吸光信号稳定；使用塞曼系统可以消除Fe、Co对196nm分析线的干扰，Cr和Ni对Se的204nm干扰和P对Se的干扰
				最大功率	200	2100	71	37	0.21		
				常规	200	2700	150	38	0.40	热解涂层的	
				最大功率	200	1800	175	73	0.50		
			P		500	2500	—	—	—	—	
Mg	285.2	0.7	W	常规	1000	2500	0.6	0.3	0.0017	未涂层的	在火焰AA法中Mg是最灵敏的元素之一，一般不用石墨炉法测定，但测定是容易的，要注意的是沾污问题，可用NH_4NO_3作为基体改进剂
				最大功率	1000	1500	0.5	0.3	0.0019		
				常规	1200	2400	0.4	0.3	0.0014	热解涂层的	
				最大功率	1000	1900	0.5	0.3	0.0021		
			P	—	900	2400	—	—	—	—	
Mn	279.5	0.2	W	常规	1000	2700	7.3	3.4	0.018	未涂层的	Mn在石墨表面不能还原为Mn原子，而是以氧化物的形式蒸发到气相，然后热解离为Mn原子，加入硫酸或硝酸铵能降低氯化物对Mn测定的干扰。Fe有一条谱线干扰Mn的279.5nm分析线，使用L'vov平台，积分A·S测量方式，新的热解涂层石墨管，加基体改进剂$Mg(NO_3)_2$和使用塞曼背景校正器对于准确测定样品都是十分重要的条件。Dy灯在Mn的279.5nm处有谱线干扰
				最大功率	1000	2100	8.0	3.3	0.014		
				常规	1000	2600	5.3	2.8	0.017	热解涂层的	
				最大功率	1000	1900	5.8	2.8	0.019		
			P	—	1400	2200	—	—	—	—	
Mo	313.3	0.7	W	常规	1800	2700	128	97	0.27	未涂层的	钼的原子化机制可为1000℃，在石墨管中依次变为MoO_2、Mo_2C、MoC，然后转化为Mo原子。在2150℃灰化钼不会损失，在2200℃灰化超过30s，Mo逐渐逸出；灰化温度不超过2100℃，MoC不易形成，得到的吸光度信号大。过量Ca、La和Cr对Mo不产生干扰，Ti和V有轻微干扰，连续光源背景校正器在测Mo的波长处产生噪声大，应避免使用
				最大功率	1800	2700	73	73	0.19		
				常规	1800	2700	29	17	0.06	热解涂层的	
				最大功率	1800	2700	13	5	0.03		
Na	589.5	0.7	W	常规	900	2700	4.4	2.4	0.010	未涂层的	
				最大功率	900	2200	2.9	1.8	0.0071		
				常规	900	2200	2.6	1.2	0.0048		
				最大功率	800	1500	1.8	1.6	0.0054	热解涂层的	
Nd	492.4	0.2	W	—	1500	2700	—	—	—	—	用热解涂层石墨管测定Nd，检测限为10ng
Ni	232.0	0.2	W	常规	1200	2700	50	66	0.21	未涂层的	Al、Co和Fe的氯化物对Ni有干扰，K、Na、Mg和Ca的氯化物不产生干扰，K、Na、Fe和Al的硫酸盐浓度高达$1g \cdot L^{-1}$时对Ni也没有干扰，但Ca、Mg和Co的硫酸盐有一定干扰；用热解涂层管时，$MgCl_2$对Ni有干扰，而使用普通石墨管时反而没有，用平台技术测镍有许多优点
				最大功率	1200	2700	84	57	0.15		
				常规	1000	2700	22	17	0.053	热解涂层的	
				最大功率	1000	2500	18	10	0.047		
Os	290.9	0.2	W		800	2500		—			采用铜镍锍富集Pt族金属，用该法测定了合金、矿物和土壤样品中的Os

元素	λ/nm	通带宽/nm	W，P	原子化方式	最高灰化温度/℃	最佳原子化温度/℃	不同气流流速时灵敏度/pg（1%吸收） 50ml·min⁻¹	0ml·min⁻¹	灵敏度检出限/(ng·L⁻¹)	石墨管	备注
P	213.6	0.7	W	常规	1400	2700	23630	12570	114	未涂层的	用213/213.6nm双线和磷的无极放电灯EDLS测定P，检测限为3ng，在石墨中使用涂钨技术，不加化学基体改进剂得到的检测限为2ng；加入改进剂La，可在高于测分子……所需要的温度下使用热解石墨[illegible]技术，可提高灵敏度和消除基体干扰
				最大功率	1400	2700	13540	4950	23		
				常规	1600	2700	25630	12570	186	热解涂层的	
				最大功率	1600	2700	13750	5870	80		
Si	251.6	0.2	W	常规	1400	2700	170	98	0.33	未涂层的	在(1500~2150)K之间部分Si以SiO的形式损失，且必须在2900K而直接原子化，氧化物有严重干扰，延长灰化时间可降低硫酸盐干扰，Si在氮气氛中灵敏度高于氩气氛中，用镧Zr、La或Mo处理的石墨管效果最好，比普通石墨管信号高2倍，用热解涂层石墨管测Si时，加入适量Ca可使Si信号增大，用与碳易形成碳化物的金属钽箔或将用Ta和W箔衬里的石墨管对Si的测定也有改进
				最大功率	1400	2700	96	73	0.22		
			P	—	1400	2700	—	—	—	—	
Sm	429.7	0.2	W		1400	2500					在早期的工作中得出检测限为[illegible]ng，HCl对Sm测定没有干扰，但2.5mol·L⁻¹的HNO_3能使Sm信号降低25%，3mol·L⁻¹ H_2SO_4降低[illegible]%
Sn	224.6	0.7	W	常规	900	2700	56	21	0.15	未涂层的	Sn虽然原子化温度1400℃，但Sn在900℃灰化时就有明显以SnO形式损失，硫的干扰是由于生成气体SnS，石墨平台技术可减少SnS形成，用Ta、W、Zr等与石墨形成难熔碳化物的元素处理石墨管，灵敏度提高并减少了硫酸盐干扰，$(NH_4)_2HPO_4$和$Mg(NO_3)_2$混合物是有效的基体改进剂，Ni也是，能消除硫酸盐和许多氯化物干扰，Al、Cd、Fe、Na、Pb和Zn的氯化物，Al、Cd、Cr、Fe、K、Mg、Na、Pb和Zn的硝酸盐，Al、K、Mg和Na的硫酸盐对Sn测定干扰较大，若于测前预先加入L-抗坏血酸能消除或降低干扰
				最大功率	900	2200	40	17	0.087		
				常规	900	2700	275	20	1.0	热解涂层的	
				最大功率	800	2700	310	19	1.0		
			P	—	1000	2400	—				
Sr	460.7	2.0	W	常规	1300	2700	30	15	0.093	未涂层的	浓度在0.1mol·L⁻¹以上HNO_3和H_3PO_4对Sr测定有干扰，Ca、K和Mg对Sr也有干扰，5ng氯化物(Al、Mg、Ca或Na)或5ng硫酸盐(Na)对5ng Sr的测定没有干扰
				最大功率	1300	2700	13	3.2	0.023		
				常规	1300	2700	3.2	2.0	0.0237	热解涂层的	
				最大功率	1300	2500	2.9	1.6	0.0235		
Te	214.3	0.2	W	常规	600	2700	60	22	0.15	未涂层的	用连续光源背景校正器不能校正P对Te的干扰，HCl、HNO_3和H_2SO_4都使Te的信号增大，Ni能使易挥发的碲化合物变得稳定，灰化温度可提高到1200℃，许多金属氯化物对Te的测定有干扰，$NiCl_2$和$CoCl_2$使信号增大，$CaCl_2$和BaCl$_2$抑制信号，Fe和Mg的硝酸盐引起严重干扰，Cu和Ni的硝酸盐有干扰，4g·L⁻¹的$Ca(NO_3)_2$使信号全部抑制，Pd和Pt是适用的基体改进剂
				最大功率	600	1800	44	21	0.15		
				常规	600	2500	80	35	0.25	热解涂层的	
				最大功率	600	1500	74	33	0.19		
			P	—	900	2000	—	—	—	—	

续表

元素	λ/nm	通带宽/nm	W，P①	原子化方式	最佳灰化温度/℃	最佳原子化温度/℃	不同气流流速时灵敏度/pg（1%吸收） 50mL·min⁻¹	0mL·min⁻¹	灵敏度检测/(mg·L⁻¹)	石墨管	备注
Ti	365.3	0.2	W	常规	1400	2700	1005	1500	3.4	未涂层的	无机酸对Ti的信号有严重影响，必须使用专门处理过的石墨管进行最佳测定
				最大功率	1400	2700	390	470	1.7		
				常规	1400	2700	113	88	0.27	热解涂层的	
				最大功率	1400	2700	60	43	0.17		
Tl	276.8	0.7	P	常规	400	2300	30	15	0.10	未涂层的	卤化物能降低Tl的吸收信号，Tl的原子化温度比卤化物的挥发温度低，当样品中含有卤化物时，可使用STPF平台测定，将φ为0.5%的HCl和HClO₄低抑制Tl信号，用预热处理可降低氯化物干扰，加入适量Li可减少NaCl干扰，基体改进剂1%H₂SO₄
				最大功率	400	1600	43	20	0.13		
				常规	400	2500	57	13	0.13	热解涂层的	
				最大功率	400	2100	37	15	0.080		
					600	1400	—	—	—	—	
Tm	371.8	0.2	W		1900	2600					Ca使Tm的信号增强，其他金属对Tm没有干扰
U	358.5	0.2	W	常规	1000	2700	13500		40	热解涂层的	用钽Ta层石墨管测铀，其特征浓度为40mg/0.0044，用热解涂层石墨管的特征浓度只有2.4mg/0.0044，可见由于形成了碳化物
				最大功率	1000	2700	11200		33		
V	318.4	0.7	W	常规	1500	2700	350	275	0.48	未涂层的	加入抗坏血酸可降低FeCl₃对V的干扰，可使用Mg(NO₃)₂作基体改进剂；STPF技术测定V的条件也适用于石墨管原子化
				最大功率	1500	2700	232	191	0.30		
				常规	1500	2700	88	52	0.10	热解涂层的	
				最大功率	1500	2700	45	30	0.1		
Y	410.2	0.2	W		1400	2700	—	—	—	—	镧全碳化物层石墨管的灵敏度高于未处理过的热解涂层石墨管，稳定10次后，管壁石墨层严重烧蚀，灵敏度明显下降，热解涂层石墨管老化程度小
Yb	398.8	0.2	W	常规	1300	2700	22	16	0.055	未涂层的	Ba、Sr、Fe、Ca、Mg、Na和Al抑制Yb的信号，稀土元素会增大信号，用热解涂层石墨管比普通石墨管好，使用平台技术的检出限为25pg
				最大功率	1300	2650	14	10	0.040		
				常规	1300	2700	5.6	3.9	0.017	热解涂层的	
				最大功率	1300	2500	5.0	2.5	0.017		
Zn	213.9	0.7	W	常规	400	2200	2.2	0.9	0.0057	未涂层的	测Zn灵敏度很高，只要严格控制分析条件，卤化物对测Zn干扰很小，STPF平台测Zn是很理想的；但测Zn要注意污染问题，Fe在一定条件下干扰Zn的测定，使用平台可消除干扰，否则在分析液中会有干扰
				最大功率	400	1700	2.2	1.1	0.0057		
				常规	400	2100	2.2	0.5	0.0050	热解涂层的	
				最大功率	400	1900	2.2	0.7	0.0005		
			P		600	1900	—	—	—	—	

① W是管壁原子化，P是平台原子化。

1. 原子化方式

指待测元素原子化的方式（即加热速率）。常规方式（NORM）系指以相当慢的升温速率常规地控制电压的加热方式。

最大功率（MP）系指最大功率方式。该方式的特点是以很快的速率升温。

2. 最佳灰化温度

此为针对特定基体的最高温度，在此温度下可完成试样的热预处理（灰化），而待测元素不受损失。

3. 最佳原子化温度

最佳原子化温度是指以最高的灵敏度使待测元素原子化的温度，再升高温度通常不会使灵敏度增高。

4. 灵敏度

灵敏度为产生1%吸收信号的以pg表示的元素质量。

所引用的灵敏度值是在内充净化气体，气流流速为50ml・min^{-1}和气流中断条件下取得的。用氩气作为净化气体。

5. 灵敏度检查

指用20μl试液进行测量时产生0.200吸光度信号时的元素浓度，以μg・ml^{-1}表示。灵敏度检查值系在氩气净化气流流速50ml・min^{-1}条件下确立的，引用的浓度为参考值，其变化应在±25%以内。

6. 石墨管

系指使用的石墨管类型。

“未涂层的”指使用的是标准的高密度石墨管。

“热解涂层的”指使用的是内壁涂有热解石墨（随机的和市售的）的石墨管。热解涂层石墨管对于测定有机基体的试样益处不大。

第四节　原子吸收光谱法的应用

一、火焰原子吸收光谱法的应用

表8-4给出了自80年代以来我国发表的部分火焰原子吸收光谱的应用文献，以分析物质分类，包括天然水、废水、海水；生物样品；食品；中药；有色金属及合金；工业原料与化工产品及地质样品等。

表8-4　火焰原子吸收光谱法的应用

分析物质	分析元素及方法	文献
天然水、废水、海水	Cu、Zn、Cd（PAN-聚氨酯泡沫富集）	1
	Cu、Pb、Zn、Cd、Mn、Ni、Co、Fe（离子交换分离）	2
	环境水中Cu、Pb、Zn、Cd	3
	废水中Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Cd、Fe(APDC-MIBK萃取)	4
	污水中Pb、Cd、Cu（KI-MIBK萃取）	5
	海水中Cu、Zn、Pb、Cd(DDTC-CCl_4萃取)	6
	海水中Cu、Pb、Co、Ni、Fe、Mn、Cd、In（活性炭浓集）	7
	海水中Cu、Cd（巯基棉富集）	8
天然水、废水、海水	天然水中Li、Na、K	9
	地表水中Cu、Cd、Fe、Co、Mn、Ni（离子交换富集）	10
	地表水中K、Na	11
	水体中Cu、Pb、Zn、Cd、Fe、Mn、Cr、Co、Ni等（阳离子交换树脂富集）	12
	Cd，Pb，Cu	13
	废水中Fe、Mn	14
	海水中Sr、Li	15
	Pb，Zn，Ca（双硫腙负载树脂富集）	16
	碱金属	17

续表

分析物质	分析元素及方法	文献
天然水、废水、海水	Cu, Co, Ni, Bi, Pb, Cd (DDTC-MIBK 萃取)	18
	Pb（黄原脂棉富集）	19
	Ag, Pb, Cd, Au, Bi, Cu（浮选分离富集）	20
	Cu, Cd（氯化三辛基甲基胺萃取分离）	21
	Cd, Pb, Cu（FIA 在线预浓集）	22
	Cd, Pb, Cu（巯基棉富集）	23
	Pb（巯基棉富集，石英缝管）	24
	Cu（黄原脂棉富集）	25
	Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn（在线预富集）	26
	Cu, Pb, Zn（黄原脂棉富集）	27, 28
	Pb（黄原脂棉富集）	29
	Cu, Cd（黄原脂棉富集）	30
	地表水中 Cu, Pb, Cd（表面活性剂增感）	31
	地面水中 Cu, Pb, Zn, Cd（凝聚浓缩-巯基棉富集）	32
	天然水杂质	33,34
	大气降水中 Ca, Mg	35
	海水中 Cu, Pb, Cd, Mn（PR 螯合树脂在线分离）	36
	卤水中 Cu, Zn, Fe, Co, Ni, Pb, Mn（DBTC-MIBK 萃取分离）	37
	环境水（干扰消除）	38
	工业废水中 Cd（不锈钢管原子化捕集器）	39
	污染水（在线串联式树脂分离有机质）	40
	Zn（307.6nm）	41
	水中 K、Na（硝酸铯作电离缓冲剂）	42
	生活饮用水中 Ag	43
	水中 Ag（双硫腙-乙酸丁酯萃取）	44
	水中 Fe、Mn、Cd	45
	电镀污水中 Cu、Zn、Pb（浓缩 6 倍）	46
	水中 Pd（分离富集）	47
	水中 Sr、Ag、K、Na	48～50
生化样品	新生儿血中 Ca、Mg	51
	头发中 Pb、Cd、Cr	52
	血清中 K、Na、Ca、Mg、Cu、Fe、Zn	53
	犬血、肌肉中 Ca、Mg、K	54
	人发中 Ca、Mg	55
	人发中 Ni、Co	56
	人胆汁中 Ca、Mg、Zn、Cu	57
	心肌中 K、Na、Ca、Mg	58
	人发中 Cu、Zn、Fe、Mn	59
	人发中 Cu、Zn、Fe、Ca、Mn、Mg	60
	人发中 Cu、Zn	61
	人发中 Cu、Zn、Fe、Ca、Mg、K、Mn	62
	人发中 Cu、Zn、Ca、Mg、K、Na、Mn	63
	人发中 Cu、Zn、Fe、Pb、Ca、Mg	64
	人发中 Sn	65
	人发中 Ca	66
	人发中 Co，SCN-TBP 体系萃取	67
	人发中 Sr，EDTA 消除	68
	尿中 Zn	69
生化样品	尿中 Cu、Zn	70
	血液中 Ca、Mg、Cu、Zn	71
	血液中 Cu、Zn、Fe、Mg、Pb、Cd	72
	血液中 Cu、Zn、Fe、Mn、Co、Cr	73
	血液中 P（磷钼酸间接法）、Ca	74
	血液中 Zn	75
	大鼠组织及血清中 Zn、Cu、Ca、Mg	76
	兔血中 Cu、Fe、Zn	77
	血液中 Cu、Zn	78,79
	人体细胞中 K、Na	80
	胆结石中 Cu、Zn、Mn	81
	红细胞膜中 Ca	82,83
	白细胞中 Zn、Cu、Mn、Mg	84
	红细胞膜中 Mg	85
	血清中 Zn	86,87
	血清中 K、Na、Ca、Mg	88
	血浆中 Zn、Cu、K、Na、Ca、Mg	89
	人血、唾液、尿中 Li	90
	细胞内外中 Ca	91
	人发中 Ca	92
	人发中 Cu、Fe、Zn、Cr	93
	人发中 Zn、Cu、Fe、Ca、Mg	94
	人发中 Ni，Pb	95
	人发中 Pb，Cd（PAN 共沉淀富集，微注射进样）	96
	尿 Pb（Bi 盐共沉淀富集）	97
	红细胞内 Li	98
	红细胞膜上 Cu、Zn	99
	红细胞中 Zn、Cu、Mn、Mg	100
	全血中 Cu、Zn、Fe、Ca、Mg、Cr、Mn、Al	101
	血清及人发中 Cu、Zn、Fe、Mg	102
	血清中 Cu、Fe、Zn、Mg、Mn、Mo、Cr、Ca	103
	血清中 Zn、Cu、Mg、Fe、Ca	104,105
	血清中 Zn、Cu	106,107
	血浆中 Zn、Cu	108
	血液中 Ca、Mg、Fe、Zn、Cu、Na	109
	血、发、尿中 Zn、Cu、Fe、Cd、Pb、Ni	110,111
	猪血红素中 Zn、Cu、Fe、Mn、Cd、Pb、Ni、Mg、Ca	112
	血浆及红细胞中 Mg	113
	血清中 Cu、Fe、Zn、Mg、Mn、Co、Cd、Ni、Cr	114
	全血及头发中 Zn、Cu、Fe、Ca、Mg、Mn	115
	血清中 K、Na、Ca、Mg	116
	血清中 Zn	117
	血清中 Ca、Cu、Pb、Mg、Mn、Zn	118
	人发中 Cd、Cr、Ni	119
	人发中 Cu、Zn	120,121
	人发中 Ca、Cu、Mg、Mn、Na、Zn	122
	人发中 Ca、Cu、Fe、Mn、Zn	123
	人发中 Cu、Fe、Zn	124
	精液中 Cu、Fe、Mn、Zn	125
	尿中 Al（N_2O-C_2H_2 火焰）	126
	兔肝中 Cu、Zn	127
	小白鼠组织和骨中 Ca、Cu、Fe、Mg、Zn	128
	大鼠心肌中 Ca	129

续表

分析物质	分析元素及方法	文献
生化样品	胆结石中 Ca、Na	130
	胎儿内分泌腺中 Cd、Cu、Fe、Mg、Mn、Zn	131
	胃液中 Ca、Cu、Fe、Mg、Zn	132
	大鼠脑组织中 Ca	133
	小鼠肝脏中 Cu、Fe、Zn	134
	人子宫内膜组织中 Ca、Cu、Fe、Mg、Zn	135
	细胞、血浆、血清、头发、人胸水、人体胆结石、趾甲中 Cu、Fe、Zn、Ca、Mg	136~144
食品	作物中 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni	145
	小麦粉中 Fe、Mn、Cu、Cd、Cr、Ni、Pb、Co	146
	粮食中 Cu、Zn、Pb、Cd	147
	氨基酸中 Cd、Cr、Pb	148
	茶叶中 K、Na、Ca、Mg、Mn、Cu、Zn、Pb	149
	茶叶中 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cd	150
	人造奶油中 Pb、Cu、Ni	151
	梨罐头 Cu、Fe、Mn、Pb、Zn	152
	葡萄酒中 Cu（DDDC-MIBK 萃取）	153
	松花蛋中 Pb、Cd、Cu（20%H_3PO_4-碘化物萃取）	154
	糖品中 K、Na、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn	155
	茶叶中 Ca，Mg，K，Na，Fe，Mn，Rb	156
	小麦粉，大米粉中 Cu、Mn、Zn（悬浮液喷雾）	157
	饮料中 K	158
	酱油中 Pb（APDC Cu（Ⅱ）共沉淀分离富集）	159
	酱油中 Cd（PAN-Ni（Ⅱ）共沉淀分离富集）	160
	竹笋中 Ca、Mg	161
	魔芋中 Cu、Fe、Zn、Mn、Ca、Mg、Ni、Co	162
	茶叶中 Cu、Zn、Ni、Mn、Fe、K、Ca、Mg（$La(NO_3)_2$ 作保护剂）	163
	食品 Cu、Pb	164
	加工食品中 Ca、Fe、Mg	165
	大豆、茶叶中 Fe、Mn	166
	营养素中 Ca、Cu、Fe、Mg、Mn、Na、K、Zn	167
	饮料及灵芝酒中 Ge	168
	黑米中 Fe、Mn、Zn	169
	鸡蛋中 Cu、Fe、Mn、Zn	170
	食品及饮料中微量元素	171~176
中药	人参中 K、Na、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn、Mn、Sr、Pb、Ca、Ni、Cr、Ba	177
	枸杞子中 K、Na、Ca、Mg	178
	天然花粉中 K、Na、Ca、Mg	179
	天然花粉中 Fe、Cu、Zn、Mn	180
	沙棘汁中 K、Na、Ca、Fe、Cu、Zn	181
	沙棘汁中 Mg、Mn	182
	牧草中 Cu、Co、Fe、Mn、Mo、Zn（微量进样）	183
	党参、黄芪、白术、甘草中 Li	184
	酸枣仁与理枣仁中 Ca、Cd、Cu、Fe、Mg、Mn、Ni、Zn	185
	巴戟天中 K、Na、Ca、Mg 等 12 种元素	186
中药	兰科长梗南五味子中 Ca、Cu、Fe、Mg、Mn、Ni、Zn	187
	萃仙丹中成药中 Cu、Fe、Mg、Mn、Zn	188
	抗癌药卡铂中 Ag	189
	人参中 Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr、Zn	190
	大皂角及猪牙皂中 Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Zn	191
	桃叶、人参等 10 种中草药、半枝莲、余甘子、中药制剂和金维他中十几种金属元素	192~197
有色金属及合金	金属锑中 Cu、Fe、Pb	198
	纯锂中 Cu、Ni、Mn、Zn、Cd、Cu、Pb（螯合树脂分离）	199
	纯钙中 Mn、Cu、Fe、Ni	200
	钛粉中 K、Na	201
	铝合金中 Mg、Cu、Mn	202
	铅合金中 Rh、Pb、Au	203
	金基合金中 Pd、Fe、Ni、V	204
	白合金中 Cd、Ni、Pb、Fe	205
	铝、镍、钴磁钢中 Cu、Ni、Co	206
	铜合金中 Sn、Pb、Zn	207
	锡合金中 Cu、Fe、Pb	208
	钢中 Pb、Bi、Sb、Ag（流动注射-原子吸收）	209
	高硬度钢中 Be、Si、Ti、Ni、Co、Mn	210
	钢中 Cr、Mo	211
	纯银中 Cu、Zn、Cd、Ni（氨羧螯合树脂分离）	212
	银基合金中 Zn、Sn、In、Sb	213
	铜合金中 Cu、Zn 等	214
	铋中 Ag、Cu、Pb、Zn	215
	铅基合金中 Cu、Ni、Zn、Cd、Co、Mn、Sb、Bi	216
	稀土硅钡中间合金中 Ba、Ca、Mg、Re	217
	焊锡中 Cu、Fe、Zn	218
	钛合金中 Fe、Co、Ni、Mn、Cu、Cr、Mo、Sn	219
	钨基合金中 Fe、Mn、Ni、Cu、Co	220
	锌板中 Cu、Fe、Pb	221
	高钨钢中 Mn、Ni、Mo、Cu、Cr、Co	222
	铍铜中 Ni、Co	223
	铬硬质合金中 Cr	224
	锡铟铅合金中 Sn、In、Pb	225
	铝合金中 K、Ca（Li 做电离抑制剂）、Cu、Mg、Mn、Zn	226、227
	银基合金中 Pb、Cd、Ni、Mn	228
	钛合金中 Si、Pd、Y	229、230
	铁镍合金中 Ca	231
	金属钙 Fe、Ni、Cu、Mn（DDC-$CHCl_3$ 萃取）	232
	高纯钴粉中 Ni、Fe	233
	纯金属铋中 Pb、Zn、Cd（N_{263} 萃取）	234
	金属锑中 Cu、Fe、Pb	235
	锰青铜中 P、Si（利用 PO_4^{3-}、SiO_3^{2-} 对 Ca、Mg 干扰间接求得）	236
	铅黄铜，锡青铜中 Pb	237
	高纯阴极铜中 Ag（巯基棉富集）	238
	铜线镀层中 Sn、Pb	239
	金属钠中 Ca（真空蒸馏分离）	240

续表

分析物质	分析元素及方法	文献
有色金属及合金	锶硅铁合金中 Sr（镧盐、抗坏血酸消除干扰）	241
	钨中 Mo	242
	锡锭中 Cu、Fe、Pb、Zn	243
	铍青铜中 Be（N_2O-C_2H_2 火焰）	244
	铅板栅中 Al、Ca、Cu（用 HCl 沉淀铅基）	245
	钨矿中 Sn（用 NH_4I 挥发锡）	246
	镍基合金中 Bi（电解将 Bi 析出于阴极）	247
	纯金属或合金中杂质元素	248～253
	马口铁中 Sn	254
	镀锌钢丝中 Zn	255
工业原料与化工产品	氯锡酸铷、铯中 K、Rb、Cs、Sn	256
	钨酸铵中 Mg、Ca	257
	LiOH 中 Ca、Mg	258
	海盐中 Cu、Zn、Co、Mn、Fe（螯合树脂富集）	259
	润滑油中 Fe、Cu、Ni	260
	添加剂与润滑油中 Ca、Ba、Zn	261
	添加剂与润滑油中 Fe、Cu	262
	水泥中 K_2O、Na_2O	263
	锑铁催化剂中 Sb、Fe、Cu、Te	264
	硅酸铅中微量元素	265
	氯化镍中 K、Na、Ca、Mg	266
	氯化镍中 Ca、Mg	267
	硫酸镍中 Cu、Pb、Zn、Fe	268
	氰化液中 Au、Ag	269
	锂盐中 Mg、Cd	270
	锂盐、金属锂中 Mg、Zn、Cd（萃取）	271
	钨酸铵中 Ca、Mg	272
	磷肥中 Ca、Mg	273
	氯化铝中 Fe,Na,Cu,Pt,Sn,Si 等	274
	锂盐中 Mn、Cr、Zn、Cd、Fe、Co、Ni、Pb（DEDTC-MIBK 萃取）	275
	锂盐中 Ca（BPHA-正丁醇萃取）	276
	碱金属盐中 Cu、Zn、Cd、Fe、Co、Ni、Pb（DEDTC 萃取）	277
	催化剂中 Fe、Pt、Pd	278～280
	氮化硅中 Ca、Mg、Fe	281
	碱式氯化铝中 Pd、Cd（H_3PO_4-KI-MIBK 萃取）	282
	加氢催化剂中 Sn	283
	703 摩擦材料中 Fe、Pb、Mo、Sn	284
	润滑油中 Ba（十二烷基磺酸钠和苄基二甲基氯化铵增感）	285
	Al_2O_3 中 CaO（SDS 增感）	286
	MnO_2 中 Fe	287
	硫酸镍中 Cu、Pb、Zn、Mg、Ca（丁二酮肟沉淀分离）	288
	氯化锑中 Pb	289
	亚硫酸钠中 Pb（APDC-MIBK-环己烷体系萃取）	290
	聚丙烯树脂中 Al、Ti（钼酸钠抑制 Si 干扰，氟化铵消除 Al 对 Ti 干扰）	291
	稀土氧化物中 Pd、Cd、Co、Ni、Fe、Cu（APDC-MIBK 体系萃取分离）	292
	汽油中 Co（十二烷基硫酸钠微乳液进样）	293
	润滑油中 Al、Cr、Cu、Fe、Pb	294
工业原料与化工产品	淀粉中 K	295
	含卤素金属原子簇化合物中 Ag	296
	石油裂解催化剂中 Cu、Fe、Na	297
	电子玻璃中 As	298
	彩色荧光屏壁玻璃中 K、Na、Ca、Mg、Fe	299
	硝基铅笔漆中 Pb（酸萃取）	300
	磷酸中 Fe、Pb（氘灯扣背景）	301
	精对苯二甲酸中的 Mo	302
	钡硅中的 Al、Ba、Ca	303
	钙盐、镧盐中 Sr	304
	钛酸钡锶中 Ba 和 Sr	305
	工业硅和对氨基乙酰苯胺中 Fe	306、307
	硫酸铜中杂质	308
	一水柠檬酸中杂质	309
地质样品	岩石、矿物中 Cu、Pb、Co、Ni、Zn	310
	岩石、矿物中 Li、Rb、Cs	311
	锂硅酸盐岩石中 Li、Rb、Cs	312
	矿石中 Ag、Cd（KI-MIBK 萃取）	313
	矿石中 Cu、Pb、Zn、Hg	314
	矿石中 Co、Ni、Cu（DDTC-MIBK 萃取，APDC-MIBK 萃取）	315
	重晶石中 Ba、Sr、Ca	316
	选矿试剂中 Pb、Zn	317
	矿石中 Li、Rb、Cs	318
	化探样品 Au、Pd	319
	硅酸盐中 Fe、Ca、Mg、Mn、K、Na、Rb 等	320
	钾长石中 K、Na	321
	锰矿中 K、Na、Ca、Mg 等	322
	重晶石中 Pb、Mn、Cu、Fe、Zn（铜试剂活性炭富集）	323
	铁矿石中 K、Na	324
	石灰石中 K、Na、Ca、Mg、Cu、Zn、Ni、Cr、Fe、Cd、Mo	325
	石灰石中 Si、Al、Fe、Mg	326
	岩石中 Al；K、Na；Fe、Sr、Pb；Ba	327～331
	矿石中高含量 Fe；Bi；高含量 Sb；高含量 Sr	332～335
	方铅矿单矿物中 Cu、Zn、Co、Ni、Cd、Ag、Fe、Mn、Ca、Mg	336
	化探样品中 Cd；Cu、Pb、Zn、Ag、Cd；Cu、Zn、Pb、Ni、Co、Li、Fe、Mn、Ag、Cd；Cr；Ag、Cd、Li、Co、Ni；Cu、Pb、Co、Ni（乙基黄原酸钾-MIBK 萃取）	337～341
	矿石、化探样品中 Au（石英舟法）；Au（巯基棉富集）；Au（泡塑富集，链式管）；Au（充炭泡塑富集）；Au（泡塑吸附）；Au（黄原酯棉分离）；Au（冷溶法）；Au（双硫腙萃取）；Au（三元配合物浮选分离富集）；Au（*N*,*N*-二仲辛基乙酰胺萃取）；Au（碘-碘化钾萃取）；Au（铅扣）	342～356
	矿石、化探样品中 Ag（巯基棉分离）	357
	矿石、化探样品中 Pd（Bi（DDC）$_3$ 置换萃取）	358
	Pd（α-正十二烷巯基乙酸乙酯萃取）	359
	矿石、化探样品中 In	360
	矿石化探样品中 Ga、In、Tl	361
	Ag（FIA 在线萃取）	362

续表

分析物质	分析元素及方法	文献	分析物质	分析元素及方法	文献
地质样品	Ag（黄原脂棉吸附）	363	地质样品	矿石中 Pd（氨基硫脲纤维素分离富集）	378
	Ni（丁二酮肟-乙酸乙酯体系浮选分离）	364		砂金中 Ag、Au（王水溶解，沉淀分离并以硫脲络合银）	379
	Cu，Pb，Zn，Cd，Co，Ni	365		地质样品中 Ag、Cu、Pb、Zn	380
	矿石 Au（异戊醇萃取）	366		磷矿石中 K、Na、Ca、Mg、Mn、Cu、Zn、Fe、Pb	381
	矿石 Au（泡塑色层分离富集）	367		硅藻土中 Ca、Fe、Mg	382
	矿石 Zn	368		磷材料中 K，Na（加 HCl 和 Al 消除干扰）	383
	矿石 Bi（高含量）	369		化探样品中 Cu（黄原脂棉富集分离）	384
	冰晶石 Na（330.2nm 测）	370		重晶石中 Cd、Pb（乙基磺原酸钾-MIBK 萃取）	385
	辉锑矿 Au（活性碳吸附，柠檬酸消除锑干扰）	371		土壤样品中 Cu、Fe、Mn、Zn	386
	磷硫铝锶矿石中 Sr、Ca、Mg（La 盐作释放剂）	372		矿石中 Cu	387
	锑矿 Pb	373		锌精矿中 Pb	388
	磷矿石 Pb（双硫腙-四氯化碳萃取）	374		辉碲矿中 Te、Bi 及杂质元素	389，390
	锌精矿 Zn	375			
	矿石中 Ag（硫代苯甲酰苯胺萃取）	376			
	矿石中 Ag（HCl 和 HNO_3 溶解后用硫脲络合）	377			

本表参考文献：

1 周志瑞．高等学校化学学报，1983；4(2)：179
2 杨世德．光谱学与光谱分析，1985；5(6)：8
3 吴德秀等．杭州大学学报，1985；12(1)：103
4 归俊等．分析化学，1985；13(7)：558
5 王小慧等．光谱学与光谱分析，1984；4(1)：40
6 朱良晋等．海洋环境科学，1984；3(1)：51
7 林贞钦．环境科学丛刊，1984；5(8)：45
8 张慧敏．光谱学与光谱分析，1985；5(5)：60
9 张晓黎．分析试验室，1988；7(3)：59
10 冯荣周．中国环境监测，1987；3(1)：67
11 吴奇藩，梁方使，陈远霞．分析测试通报，1986；5(6)：44
12 田一平，余德喜，金关莲．环境科学与技术，1988；(1)：22
13 吴 军．黑龙江环境监测，1986；(4)：16
14 马 伶．中国环境监测，1987；3(1)：77
15 易瑞灶等．海洋科学，1988；(1)：28
16 孙晓娟等．光谱学与光谱分析，1989；9(5)：9
17 张晓黎．分析试验室，1988；7(3)：59
18 庹永等．理化检验（化），1990；26(6)：349
19 张继县．地质实验室，1989；5(6)：333
20 吴绍祖．光谱学与光谱分析，1989；9(6)：59
21 杜乃林等．分析化学，1988；16(6)：516
22 Fang Zhaolun，Guo Tiezheng，Welz B．Talanta，1991；38：613
23 翟贵仙．光谱学与光谱分析，1992；12(1)：119
24 张明英，袁兰珍．光谱学与光谱分析，1991；11(5)：62
25 蔡述伟．理化检验（化），1992；28(2)：113
26 Hou Chungfang，Wang Huiqi，Qiao Guixian et al. 第四届北京分析测试报告会及展览会（BCEIA）摘要．1991年10月，北京
27 张 忠，张继县．岩矿测试，1991；10(增)：26
28 张 忠，张继县．冶金分析，1993；13(1)：53
29 蔡述伟．岩矿测试，1991；10(4)：304
30 蔡述伟．岩矿测试，1991；10(增)：10
31 代凤娥，王凤林．岩矿测试，1991；10(增)：22
32 孙福明．全国第四届原子光谱分析学术报告会论文摘要．1992年10月，厦门（225）
33 吴 杰．同 32：238
34 范 斌．同 32：276
35 林伦志．中国化学会第四届分析化学年会第三届无机微量技术与痕量分析学术讨论会论文摘要．1991年5月，天津：E046
36 曹宝纯等．第四届全国流动注射分析学术报告会论文摘要．1993年4月，武汉：195
37 沈振天，聂 峰，陈 奕．理化检验（化），1991；27(5)：273
38 田一平．理化检验（化），1991；27(1)：44
39 赵进沛等．分析化学，1992；20(6)：741
40 胥学鹏等．同 36：195
41 陈国亮．岩矿测试，1991；10(增)：15
42 李志琪．理化检验（化），1993；29(3)：159
43 刘国辉．光谱实验室，1994；11(1)：33
44 肖 波等．光谱仪器与分析，1994；(1)：38
45 高 欣．光谱实验室，1993；10(5)：65
46 严加静．分析仪器，1994；(2)：64
47 Zhongxiao Wang，et al．Anal．Lett．，1994；27(5)：957
48 郭瑞娣．理化检验（化学分册），1995；31(5)：299
49 吴学昭等．分析测试仪器通讯，1995；5(4)：217
50 李 文等．微量元素与健康研究，1996；13(2)：52
51 蔡起秀等．光谱学与光谱分析，1985；5(3)：35
52 周志文等．光谱学与光谱分析，1984；4(5)：40
53 林葆华等．工业卫生与职业病，1985；11(3)：175
54 李天佑等．光谱学与光谱分析，1984；4(2)：54
55 郭金雪等．北京师范大学学报（自），1987；(4)：72
56 胡淑元．分析试验室，1987；6(12)：27
57 刘建平．新疆大学学报，1986；3(3)：80
58 阿不来提等．新疆大学学报，1987；4(1)：51
59 袁庆华．分析化学，1989；17(1)：封三
60 袁庆华．分析试验室，1988；7(10)：61
61 袁庆华．理化检验（化），1985；25(3)：168
62 冯秀文等．光谱学与光谱分析，1990；10(5)：76
63 刘江潮等．地质实验室，1990；6(5)：272
64 徐淑芳等．地质实验室，1990；6(3)：42
65 罗方若等．地质实验室，1988；4(6)：357
66 黄 菊等．地质实验室，1990；6(4)：229
67 侯永根等．痕量分析，1988；4(2)：42
68 李赛君等．理化检验（化），1990；26(2)：94
69 张小曳等．分析测试通报，1990；9(2)：6
70 姚继承等．理化检验（化），1988；24(4)：243

71 沈路一等．分析测试通报，1988;7(6):77
72 蔡悦林．理化检验（化），1989;25(4):231
73 刘江潮等．地质实验室，1990;6(6):342
74 周国君．分析测试通报，1989;8(4):36
75 陈国安等．理化检验（化），1990;26(4):250
76 李祥云等．光谱学与光谱分析，1989;9(2):70
77 巩淑清等．光谱学与光谱分析，1989;9(4):62
78 张龙庄等．光谱学与光谱分析，1988;8(6):58
79 李毓贵等．光谱学与光谱分析，1989;9(2):65
80 何金兰等．光谱学与光谱分析，1988;8(5):56
81 袁庆华等．理化检验（化），1990;26(4):247
82 杨根元等．光谱学与光谱分析，1991;11(5):65
83 徐德选等．岩矿测试，1991;10(增刊):18
84 张宏绪，王树叶．光谱学与光谱分析，1990;10(6):71
85 杨根元等．分析试验室，1993;12(2):37
86 朱志国等．光谱学与光谱分析，1992;12(6):77
87 Fan Jian, Luo Chongqing, Wang Shi. At Spectrosc. 1991;12:212
88 周志法，熊 伟，叶孝官．分析测试通报，1991;10(6):54
89 王兆军等．光谱学与光谱分析，1992;12(4):79
90 汪明礼，陈国平．光谱学与光谱分析，1992;12(1):123
91 蔡起秀，沈茂尾，薛长发．光谱学与光谱分析，1992;12(3):105
92 张继县．光谱学与光谱分析，1992;12(1):108
93 王 琦．理化检验（化），1991;27(1):55
94 陈菊英，黄 菊．理化检验（化），1992;28(2):108
95 王淑俊．理化检验（化），1992;28(5):313
96 苏耀东，陈 俊．光谱学与光谱分析，1992;12(3):101
97 姚 俊，庹 永．理化检验（化），1992;28(2):102
98 车东秀等．光谱仪器与分析，1993;(2):8
99 徐德选等．微量元素与健康研究，1993;10(1):45
100 张宏绪等．微量元素与健康研究，1993;10(2):27
101 李国璋等．微量元素与健康研究，1993;10(1):14
102 宋 宇等．微量元素与健康研究，1993;10(1):17
103 莫志平等．微量元素与健康研究，1993;10(2):12
104 张燕燕等．微量元素与健康研究，1993;10(2):24
105 陈立章等．微量元素与健康研究，1993;10(4):50
106 耿 勇等．微量元素与健康研究，1993;10(2):31
107 朱志国等．光谱学与光谱分析，1993;13(5):89
108 王秀萍等．微量元素与健康研究，1993;10(3):3
109 高秋华等．微量元素与健康研究，1993;10(3):6
110 孙安琪等．微量元素与健康研究，1993;(3):26
111 胡淑元等．微量元素与健康研究，1993;10(3):49
112 刘 可等．微量元素与健康研究，1993;10(3):30
113 常跃明等．微量元素与健康研究，1993;10(3):62
114 吕以杰等．微量元素与健康研究，1993;10(4):16
115 安长新等．微量元素与健康研究，1993;10(4):20
116 冯秀文等．光谱仪器与分析，1993;(3):29
117 王友基．光谱仪器与分析，1993;(3):36
118 张达生等．分析科学学报，1994;(2):41
119 王 红．光谱实验室，1993;10(1):43
120 芮群生等．微量元素与健康研究，1993;10(3):63
121 王艳芳等．微量元素与健康研究，1993;(1):21
122 谭绍熙等．微量元素与健康研究，1993;10(3):54
123 王增荣等．微量元素与健康研究，1993;10(3):59
124 周克元等．微量元素与健康研究，1993;10(4):52
125 郭海鸽等．微量元素与健康研究，1993;10(1):19
126 赖家平等．分析化学，1994;22(5):531
127 巩淑清等．光谱学与光谱分析，1993;13(5):95
128 籍雪平等．光谱学与光谱分析，1993;13(5):99
129 蔡起秀等．光谱学与光谱分析，1994;14(2):101
130 袁庆华等．光谱学与光谱分析，1993;13(4):99
131 栗香莲等．微量元素与健康研究，1993;10(1):7
132 朱 真等．微量元素与健康研究，1993;10(3):46
133 李明春等．微量元素与健康研究，1993;10(4):7
134 王纲荣等．微量元素与健康研究，1993;10(4):10
135 黄邱朝等．微量元素与健康研究，1993;10(4):57
136 杨 烨等．微量元素与健康研究，1995;12(1):46
137 孙发山等．光谱实验室，1995;12(4):11
138 张绍维等．广东微量元素科学，1995;2(3):13
139 程薇莉等．光谱学与光谱分析，1995;15(2):79
140 朱志国等．光谱学与光谱分析，1996;16(1):125
141 董银根等．光谱学与光谱分析，1995;15(2):95
142 徐德选等．光谱实验室，1995;12(6):32
143 陈燕红等．光谱实验室，1996;13(3):5
144 张松林等．光谱实验室，1996;13(4):45
145 凌联银等．农业环境保护，1985;(2):20
146 关多元等．环境科学丛刊，1983;(2):9
147 洪紫萍等．环境科学，1985;6(5):70
148 陈德芳等．南京大学学报（自），1983;(1):93
149 吴绍祖等．环境化学，1986;5(6):53
150 褚金华等．分析仪器，1987;(2):56
151 易再明等．中华预防医学杂志，1986;20(3):172
152 杜继贵等．分析试验室，1987;6(3):60
153 孙福生等．光谱学与光谱分析，1989;9(2):58
154 姚 俊等．理化检验（化），1990;26(4):241
155 肖峤玲．分析测试通报，1988;7(4):42
156 李小英等．地质实验室，1989;5(2):83
157 付凤富等．分析化学，1993;21(1):123
158 张永顺，裴世弟，张秀廷．理化检验（化），1991;27(5):305
159 苏耀东等．理化检验（化），1992;28(2):67
160 苏耀东等．分析化学，1992;20(6):698
161 冯冰玉．光谱学与光谱分析，1991;11(5):68
162 邹文武等．理化检验（化），1992;28(1):30
163 陈 颖．分析测试通报，1992;11(5):61
164 朱俊澄等．光谱仪器与分析，1993,(2):30
165 姚德海等．光谱实验室，1993;10(5):6
166 张明英等．光谱学与光谱分析，1994;14(5):85
167 王绪明等．光谱学与光谱分析 1993;13(6):73
168 董银根等．光谱学与光谱分析，1994;14(2):109
169 邱洪久等．分析试验室，1994;13(4):92
170 伊甫申等．微量元素与健康研究，1993;10(1):39
171 陈国亮等．理化检验（化学分册），1995;31(5):269
172 谢珍珍等．理化检验（化学分册），1996;32(1):28
173 朱志国等．光谱学与光谱分析，1996;16(1):117
174 何聿忠等．广东微量元素科学，1995;2(5):68
175 邱洪久等．光谱实验室，1995;12(2):25
176 朱志国等．光谱学与光谱分析，1996;16(3):116
177 姚金玉等．分析试验室，1990;9(1):16
178 袁庆华．理化检验（化），1989;25(4):246
179 袁庆华．分析测试通报，1989;8(5):30
180 袁庆华等．光谱学与光谱分析，1990;10(5):73
181 袁庆华等．分析试验室，1990;9(2):66
182 袁庆华．光谱学与光谱分析，1989;9(3):79
183 袁庆华．分析测试学报，1993;12(5):60
184 汪明礼等．光谱仪器与分析，1993;(4):29
185 杨红冰等．微量元素与健康研究，1993;10(1):62
186 黄绍铨等．微量元素与健康研究，1993;10(2):33
187 田恒康等．微量元素与健康研究，1993;10(2):41
188 赵 哲等．微量元素与健康研究，1993;10(3):20
189 金宜绚等．微量元素与健康研究，1993;10(3):32
190 汪学昭等．微量元素与健康研究，1993;10(4):30
191 张 艳等．微量元素与健康研究，1993;10(4):58
192 朱晓帆等．光谱实验室，1996;13(3):41

193 李素芬等. 广东微量元素科学, 1995;2(3):43
194 吴巧凤等. 广东微量元素科学, 1996;3(1):61
195 张俊巍等. 微量元素与健康研究, 1996;13(1):32
196 汪元妍等. 微量元素与健康研究, 1996;13(3):34
197 荆济荣等. 药物分析杂志, 1996;16(5):329
198 夏今伟. 分析试验室, 1983;(2):60
199 李淑芳. 稀有金属, 1981;5(6):53
200 李树林等. 分析试验室, 1985;4(11):16
201 金子材. 分析试验室, 1986;5(1):63
202 诸锡明等. 云南冶金, 1983;(5):56
203 李振亚等. 贵金属, 1983;4(3):83
204 姜秀玉. 分析试验室, 1986;5(8):57
205 王云翘等. 光谱学与光谱分析, 1985;5(3):52
206 田开荣. 分析试验室, 1984;3(1):3
207 姚树标. 光谱实验室, 1984;(1):33
208 胡连泉. 分析试验室, 1985;4(7):63
209 周南根. 冶金分析与测试(分), 1984;4(6):37
210 潘光华. 冶金分析与测试(分), 1985;5(1):65
211 余素芳. 光谱学与光谱分析, 1984;4(4):56
212 周志瑞等. 冶金分析, 1986;6(5):46
213 姜秀玉等. 理化检验(化), 1986;22(4):236
214 柳志龙等. 冶金分析, 1986;6(4):48
215 刘秀忠等. 江苏冶金, 1987;(3):55
216 林建基. 分析试验室, 1987;6(4):57
217 董振环等. 有色矿冶, 1987;(1):48
218 赵业展等. 安徽化工, 1987;(2):35
219 张国瑞等. 稀有金属材料与工程, 1987;(1):38
220 陈福宝. 分析测试通报, 1987;6(1):33
221 熊春生等. 武汉冶金, 1987;(2):21
222 杨俊铭等. 冶金分析, 1989;9(4):57
223 尹志学等. 分析化学, 1989;17(3):封三
224 晋 勇. 冶金分析, 1988;8(4):59
225 张明英. 光谱学与光谱分析, 1988;8(5):54
226 汪瑞华. 冶金分析, 1990;10(1):37
227 肖绪华. 光谱学与光谱分析, 1989;9(1):55
228 张 力. 理化检验(化), 1989;25(6):333
229 张纪辰. 冶金分析, 1985;9(2):53
230 董天祥. 冶金分析, 1990;10(1):52
231 于凤莲. 冶金分析, 1990;10(4):23
232 李世杰等. 光谱学与光谱分析, 1989;9(1):59
233 张龙庄. 分析试验室, 1988;7(9):60
234 邰永添等. 冶金分析, 1990;10(5):55
235 陈超英. 冶金分析, 1988;8(6):52
236 范 健, 罗重庆, 盛泽元. 分析试验室, 1993;12(2):34
237 白丙海, 焦英坤. 理化检验(化), 1991;27(5):307
238 张汉瑛, 刘凤英. 理化检验(化), 1992;28(5):280
239 孙汉文等. 理化检验(化), 1992;28(2):100
240 文希孟等. 光谱学与光谱分析, 1991;11(5):50
241 王光明. 冶金分析, 1992;12(2):21
242 莫晓山, 戴 智. 理化检验(化), 1991;27(6):348
243 刘 澜. 光谱实验室, 1993;10(3):23
244 宋文生. 光谱实验室, 1994;11(3):65
245 黄志英等. 光谱仪器与分析, 1994;(1):8
246 刘松平. 理化检验(化), 1994;30(4):241
247 杨建梁. 理化检验(化), 1994;30(4):242
248 杨岁远. 理化检验(化学分册), 1995;31(4):235
249 蔡颂惠等. 光谱实验室, 1996;13(1):30
250 李新友等. 冶金分析, 1996;16(4):45
251 左天明. 光谱实验室, 1996;13(3):17
252 郭运生等. 光谱实验室, 1995;12(5):37
253 刘 刚. 冶金分析, 1996;16(2):48
254 巩淑清等. 理化检验(化学分册), 1995;31(3):173
255 严 钊等. 冶金分析, 1996;16(2):50
256 陈先安等. 分析化学, 1983;11(4):277
257 吴绍祖等. 光谱学与光谱分析, 1985;5(6):9
258 汪明礼等. 光谱学与光谱分析, 1985;5(3):59
259 周志瑞等. 分析化学, 1984;12(6):519
260 杨先春等. 分析测试通报, 1983;2(3):47
261 孙宝湖. 分析测试通报, 1984;3(1):12
262 左振玉等. 分析化学, 1983;11(10):754
263 俞淑莺等. 水泥, 1985;(1):33
264 朱丽珠. 石油化工, 1984;13(10):668
265 刘焕文等. 湖南师范大学自然科学学报, 1987;10(3):53
266 余质坚等. 化学工业与工程, 1986;3(4):54
267 汪明礼等. 无机盐工业, 1986;(4):29
268 曹欣改等. 有色矿冶, 1987;(2):56
269 朱华章等. 地质实验室, 1986;2(3):228
270 沈振天. 分析化学, 1987;15(1):35
271 陈 奕. 理化检验(化), 1987;23(1):11
272 吴绍祖等. 分析化学, 1986;14(8):608
273 苏志刚等. 光谱学与光谱分析, 1987;7(4):58
274 范孝婧等. 光谱学与光谱分析, 1987;7(6):60
275 沈振天等. 分析化学, 1990;18(1):61
276 沈振天等. 分析化学, 1989;17(2):147
277 沈振天等. 分析化学, 1988;16(7):639
278 汪昌仑. 光谱学与光谱分析, 1988;8(5):65
279 王瑞阁. 分析试验室, 1990;9(2):65
280 陈富珍. 分析试验室, 1988;7(12):15
281 晋 勇. 分析试验室, 1989;8(6):59
282 肖郁惠等. 理化检验(化), 1990;26(4):243
283 金 璐, 徐国华. 理化检验(化), 1992;28(2):81
284 潘 悦. 冶金分析, 1991;11(4):23
285 梁春芳等. 光谱学与光谱分析, 1991;11(6):65
286 代凤娥. 光谱学与光谱分析, 1992;12(2):93
287 龙斯华, 李益国, 贺翠娥. 光谱学与光谱分析, 1992;12(3):89
288 陈人海, 忻荷美. 分析化学, 1992;20(10):1232
289 傅 明. 理化检验(化), 1993;29(2):114
290 张秀香. 理化检验(化), 1991;27(3):148
291 叶梅丽. 光谱学与光谱分析, 1991;11(5):59
292 罗淑梅. 光谱学与光谱分析, 1993;13(1):111
293 魏 琴等. 分析化学, 1994;22(4):423
294 陈思巧. 理化检验(化), 1993;29(5):268
295 单云等. 光谱实验室, 1993;10(3):16
296 唐森富. 光谱实验室, 1993;10(6):11
297 张道礼等. 光谱实验室, 1993;10(6):27
298 宫汝华等. 光谱实验室, 1994;11(3):66
299 章建康等. 理化检验(化), 1994;30(3):144
300 熊俊华. 光谱实验室, 1993;10(6):30
301 曹汝能. 光谱实验室, 1994;11(2):35
302 吴晨光等. 理化检验(化学分册), 1996;32(1):18
303 焦跟学等. 理化检验(化学分册), 1996;32(5):280
304 王建强. 理化检验(化学分册), 1996;32(1):46
305 唐森富等. 光谱实验室, 1995;12(6):29
306 魏雪松. 理化检验(化学分册), 1996;32(5):297
307 尚德昌等. 光谱实验室, 1996;13(5):30
308 赵祖亮等. 光谱实验室, 1995;12(3):56
309 梁炜等. 光谱实验室, 1996;13(1):26
310 陈中义. 冶金分析与测试(分), 1984;4(2):37
311 史富生等. 地质地球化学, 1984;(8):56
312 董正乾. 硅酸盐通报, 1983;(1):22
313 肖海峰. 理化检验(化), 1994;20(4):40
314 杨 瑜. 理化检验(化), 1985;21(5):299
315 肖海峰. 分析化学, 1985;13(11):850

316 朱昭阳. 分析试验室, 1985;4(3):15
317 王正模. 分析试验室, 1985;4(11):58
318 李绍卿. 西安地质学院学报, 1987;9(2):108
319 邓士荣. 分析测试通报, 1987;6(6):34
320 徐佳金. 分析试验室, 1988;7(2):62
321 付顺华. 有色矿石, 1987;(1):41
322 蔡孟礼等. 岩矿测试, 1987;6(2):160
323 韩芳然. 分析试验室, 1986;5(6):49
324 戴石清. 湖南有色金属, 1986;(6):46
325 忻荷美等. 光谱实验室, 1986;3(3):100
326 俞淑莺. 水泥, 1987;(2):28
327 赵宏风. 地质实验室, 1989;5(2):79
328 雷 莉等. 地质实验室, 1990;6(5):268
329 袁庆华. 地质实验室, 1990;6(6):351
330 朱传福等. 理化检验(化), 1989;25(2):112
331 韩绍荣等. 岩矿测试, 1990;9(3):201
332 王浣华. 地质实验室, 1988;5(4):191
333 胡慕良. 分析试验室, 1988;7(10):34
334 申 云. 岩矿测试, 1989;8(1):49
335 孙明英等. 岩矿测试, 1990;9(3):219
336 胡鸿儒. 冶金分析, 1990;10(2):53
337 徐达德. 岩矿测试, 1990;9(2):154
338 宋翻英. 地质实验室, 1989;5(4):207
339 刘建国. 地质实验室, 1990;6(2):90
340 龚 伟. 岩矿测试, 1989;8(4):317
341 李代白. 分析化学, 1988;16(8):768
342 袁少芝等. 理化检验(化), 1989;25(1):6
343 林 蘅. 冶金分析, 1988;8(2):57
344 吴世平等. 冶金分析, 1990;10(5):51
345 郑 德等. 冶金分析, 1990;10(5):57
346 张继县. 岩矿测试, 1990;9(3):216
347 彭召海. 理化检验(化), 1990;26(1):44
348 李思群等. 理化检验(化), 1990;26(2):120
349 地矿部金应用试验专题研究组. 岩矿测试, 1988;7(2):155
350 盛建豪等. 岩矿测试, 1988;7(1):35
351 胡鸿儒. 理化检验(化), 1989;75(6):353
352 李小娜等. 理化检验(化), 1988;24(5):290
353 方文焕等. 冶金分析, 1990;10(2):18
354 陆雍华等. 冶金分析, 1989;9(2):39
355 张宣等. 地质实验室, 1990;6(1):22
356 彭召海等. 地质实验室, 1990;6(2):20
357 郑厚德等. 冶金分析, 1989;9(5):50
358 范必威等. 分析化学, 1988;16(4):344
359 顾正康等. 痕量分析, 1990;论丛(3,4):93
360 钟业斌. 分析试验室, 1989;8(2):59
361 缪礼信等. 分析化学, 1988;16(10):918
362 汤志勇等. 岩矿测试, 1992;12(1):14
363 蔡述伟. 冶金分析, 1992;12(6):55
364 吴世英, 舒朝滨. 理化检验(化), 1992;28(6):351
365 徐达德. 岩矿测试, 1991;10(增刊):5
366 李振兴, 汪永福. 理化检验(化), 1991;27(2):123
367 王湘研. 理化检验(化), 1991;27(4):220
368 胡鸿儒. 理化检验(化), 1991;27(5):314
369 申 云. 岩矿测试, 1991;10(1):63
370 张云禄. 冶金分析, 1991;11(3):56
371 彭涌涛, 周顺菊. 岩矿测试, 1991;10(增刊):3
372 杨作明, 补 宇. 岩矿测试, 1991;10(增刊):20
373 梁 云. 理化检验(化), 1991;27(4):244
374 霍广进. 冶金分析, 1993;13(1):49
375 范 健, 王 石. 理化检验(化), 1992;28(5):292
376 顾正康等. 理化检验(化), 1993;29(5):291
377 吴若忠. 理化检验(化), 1993;29(6):367
378 侯贤灯等. 分析化学, 1994;22(5):532
379 邵文军. 光谱学与光谱分析, 1994;14(2):105
380 胡鸿儒. 理化检验(化), 1993;29(6):368
381 陈国亮等. 岩矿测试, 1994;13(1):77
382 贺与平. 光谱实验室, 1993;10(4):72
383 任志道等. 光谱实验室, 1993;10(5):62
384 薛 光. 光谱实验室, 1994;11(3):61
385 秦 莺等. 分析试验室, 1994;13(5):66
386 李丽立等. 微量元素与健康研究, 1993;10(4):36
387 马永祥等. 分析仪器, 1995;(1):60
388 梁英伦. 光谱实验室, 1995;12(4):52
389 夏凤莲等. 岩矿测试, 1995;14(4):245
390 郑大中等. 岩矿测试, 1995;14(4):250

二、石墨炉原子吸收光谱法的应用

表 8-5～表 8-10 以测定对象分类列出了自 80 年代以来国内外发表的部分石墨炉原子光谱的应用文献。测定对象包括水、地质矿产、有色金属及合金、生物样品、植物和食品、环境物质、煤、石油化工、玻璃和半导体材料等。

表 8-5 石墨炉原子吸收光谱法测定水样品

测定元素	方法说明	基体	文献	测定元素	方法说明	基体	文献
Cd	二乙基二硫代氨基甲酸钠萃取	水样	1	Cd	平台, $(NH_4)_2HPO_4$-HNO_3 作 MM	水样	6
Al、As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, V	平台技术	水样	2	Sb^{3+}, Sb^{5+}	Cu 作 MM	水样	7
				As^{5+}, As^{3+}	APDC-MIBK 萃取, Ni 作 MM	水样	8
Be	$Mg(NO_3)_2$ 为 MM①	水样	3	As	2-丁基二硫代磷酸盐萃取	水样	9
As, Ba, Cd, Cr, Pb, Se, Ag	瓦里安石墨炉技术	水样	4	Cr^{3+}	C-100 树脂预处理, 悬乳进样	水样	10
Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn	二硫代氨基甲酸酯萃取	水样	5	Cr^{5-}	液相阳离子交换	水样	11
				Ba	NH_4NO_3 作 MM	水样	12

续表

测定元素	方法说明	基体	文献
Te	Pb、Pt 作 MM	水样	13
Ba	衬钽管	水样	14
Sn	预分离，平台	水样	15
Ba	各种石墨管比较测定结果	水样	16
SO_4^{2-}	沉淀后间接测定	水样	17
Mo	二异丁酮萃取	水样	18
Cd	Zeeman+STPF	水样	19
Co	微量萃取	水样	20
P	分解后萃取	水样	21
Sn	$K_2Cr_2O_7$ 和 $NH_4H_2PO_4$ 作 MM	水样	22
Pd，Cd	La 作 MM	水样	23
Pb，Cr	6 种 MM 的比较	水样	24
Bi	溴代十六烷基三甲胺萃取	水样	25
Pb	MnO_2 棉柱富集	水样	26
Cu，Cd，Pb	—	水样	27
Sn	苦味酸作 MM	水样	28
Sn	甲苯萃取，W 管	水样	29
Pb，Cd	双管石墨管	水样	30，31
Ag	钨丝电沉积	水样	32
Se，Sn	Pb 作 MM	水样	33，34，35
Ba	锆涂层	水样	36
As	Ni 作 MM	水样	37
Pd	2-巯基苯并噻唑萃取	水样	38
Zn	污染来源及消除	水样	39
Hg	化学修饰硅胶富集	水样	40
Pb，Se	共沉淀后沉淀物	水样	41
Ag	APDC-CH_3Cl 萃取	水样	42
Tl	Pd 作 MM	水样	43
Rb	抗坏血酸为 MM	水样	44
Hg	电解富集	水样	45
Cd	$(NH_4)_2SO_4$-Tris 作 MM	水样	46
Hg^{2+}	悬乳进样	海水	47
As，Cd，Cr，Mn，Ni	平台，改进剂	海水	48
Pb，Mn，V，Mo	抗坏血酸作 MM	海水	49
痕量 Pb	Pt，Pd 为 MM	海水	50
痕量 Bi	Pd 为 MM	海水	51
Zn	柠檬酸作 MM	海水	52
Cd，Cu	柠檬酸或酒石酸作 MM，zeeman	海水	53
Cd，Cu，Ni（低于 ppb）	Ni 作 MM	海水	54
Al	—	海水	55
Pb，Cd	硝酸作 MM，zeeman	海水	56
Pb，Cd，Co，Cu，Sn，As，Mo	APDC 沉淀分离	海水	57
重金属	APDC/DDC 萃取	海水	58
Cu，Cd，Pd，As	—	海水	59
Cu，Ni，Co	预富集藻类分析	海水	60，61
Cd	酒石酸+HNO_3 作 MM	海水	62
Te	快速 GFAAS	海水	63
Gu	—	海水	64
Cd	$(NH_4)_2HPO_4$ + HNO_3 作 MM	海水	65
Cd，Pb	基体改进剂	废水	66
Tl	Pd、Pt 作 MM	废水	67
Hg	Pd 作 MM	废水	68
Tl	Pd，Pt 作 MM	废水	69
痕量 Tl	涂锆，平台	废水	70
Pb（矿山）	—	废水	71
Be	—	废水	72，73，74
Cr^{3+}，Cr^{6+}	离子交换	废水	75
Se	Zn 作 MM，zeeman	废水	76
Au，Pd	聚丙烯脒硫氰酸盐螯合纤维富集	废水	77
Cd，Co，Cu，Mg，Pb，Ca，Zn	硅胶载体聚丙烯酰胺富集	废水	78
As（电厂）	Pd 作 MM	废水	79
22 种元素	—	核溶液	80
As，Cd，Ge，Sb，Se	Mo 涂层，平台	热矿泉水	81
Si	Ca 作 MM 钨涂层	矿泉水	82
Mo	—	天然矿泉水	83
Cu	三折钨丝电沉积富集	蒸馏水	84
Au	—	自然水	85
Pb	La 处理	饮用水	86
Ba	衬钽	自然水	87
Cd	预电解富集	自然水	88
Pb	汞膜钨电极沉积	自然水	89
Mn	La-Zr 涂层	地面水	90
Cd	NH_4NO_3+H_3PO_4 做干扰抑制剂	地下水	91
Cr^{3+}	APDC 萃取	环境水	92
Pb，Cd，Cu	—	间隙水，上覆水	93
Al，Mn，Fe，Ni，Cu，Zn，Cd，Pb	—	城市雪	94
Ag	多次进样	雨水	95
痕量 Ag	APDC-MIBK 萃取	雨水	96
Cu	流动注射在线离子交换富集	雪及雨水	97
Cu，Cd，Pb，Ni	三氯乙烷萃取	盐水	98
Al	—	热水溶液	99

① 表中 MM 指基体改进剂。

本表参考文献：

1 Beaupre P W, Holland W J, Mckenney D J. Mikrochim Acta, 1983; (2): 415

2 Manning D C, Slavin W. Appl Spectrosc, 1983; (37): 1

3 李海涛，郑黎明. 光谱学与光谱分析，1995; 15(5): 61

4 Shrader D, Voth C, Covick L. Varian Instrum Appl, 1982; (16): 17

5 Liu Y, Gong B, Sun J, Lin T. Bunseki Kagaku, 1983; (32): E9

6 Pruszkowska E, Carnrick G R, Slavin, Walter Anal Chem, 1983; (55):182
7 Miyahara S, Ishibashi T. Fukuoka-shi Eisei Shikenshoho, 1982; (7):97
8 Subramanian K S, Leung P C, Meranger J C. Int J Environ Anal Chem, 1982; (11):121
9 Chakraborti D, Irgolic K J, Adams F J. Assoc off Aral Chem, 1984; (67): 277
10 Isozaki A, Kumagai K, Utsumi S. Anal Chim Acta, 1983; (153):15
11 Mazzucotelli A, Minoia C, Pozzoli L, Ariati L. At Spectrosc, 1983; (4):182
12 Roe K K, Froelich P N. Anal Chem, 1984; (56):2724
13 单孝全，倪哲明．环境科学学报，1981；1(1):74
14 孙世荣．分析化学，1986；14(7):494
15 杜新元等．分析化学，1986；14(2):90
16 王素文．分析化学，1986；14(5):362
17 魏复盛等．光谱学与光谱分析，1986；6(2):68
18 Gohda S, Yamazaki H, Shigematsu T. Anal Sci, 1986; (2):37
19 Lum K R, Callaghan M. Anal Chim Acta, 1986; (187):157
20 Shimizu T, Koyanagi H, Shijo Y, Sakai K. Chem Lett, 1986; (3):319
21 Adachi A, Kobayashi T. Eisei Kagaku, 1986; (32):39
22 Pinel R, Benabdallah MZ, Astruc A, Astruc M. Anal Chim Acta, 1986; (181):187
23 Hunt D T E, Winnard D A. Analyst, 1986; (111): 785
24 Kumar A, Aggarwal A L, Hasan M Z, Deshmukh B T. Indian J Pure Appl Phys, 1987; (25):193
25 李　军，孙　敏，赵曦白．环境科学，1987；8(4):69
26 王　俊，汤凤庆．环境科学，1986；7(3):80
27 丁国斌．中国环境监测，1987；3(1):39
28 Apte S C, Gardner M J. Talanta, 1988; (35):539
29 Pinel R, Benabdallah M Z, Astruc A, Astruc M J. Anal At Spectrom, 1988; (3):475
30 宣维康，陈猛彪．光谱学与光谱分析，1989；9(2):56
31 宣维康，陈猛彪．分析化学，1989；17(2):153
32 杨琳荣等．理化检验（化），1989；25(1):18
33 杨秀环等．痕量分析，1990；论丛(1,2):69
34 杨锦发，苏瑞芳．理化检验（化），1990；26(1):36
35 杨锦发，戴莲金．岩矿测试，1990；9(1):44
36 杨锦发．地质实验室，1990；6(2):86
37 杨锦发．地质实验室，1989；5(2):82
38 侯贤灯，徐培方，罗方若．理化检验（化），1988；24(4):227
39 姚金玉，周静茹，宋静媛．分析化学，1990；18(2):142
40 金利通等．分析化学，1988；16(3):233
41 Atsuya I, Itoh K, Ariu K. Pure Appl Chem, 1991; (63):1221
42 刘英杰，赵淑琴．理化检验（化），1991；27(6):359
43 李海涛，马冰洁．光谱学与光谱分析，1993；13(1):127
44 陈静仪等．分析化学，1994；22(6):573
45 徐树屏等．上海第二工业大学学报，1993；10(2):48
46 邵光玓等．北京科技大学学报，1993；15(4):429
47 Filippelli M. Analyst, 1984; (109):515
48 Grobenski Z, Lehmann R, Radzuik B, Voelkopf V. At Spectrosc, 1984; (5): 87
49 Tominaga M, Bansbok, Vmezaki Y. Anal Chim Acta, 1985; (169):171
50 单孝全，倪哲明．环境科学，1980；1(2):24
51 Jin Longzhu and Ni Zheming. Can J Spectrosc, 1981; (26):219
52 杨其原，倪哲明．环境科学，1981；2(6):23
53 张展霞，刘均焯等．光谱学与光谱分析，1985；5(6):5
54 Calmano W, Ahlf W, Schilling T. Fresenius'Z Anal Chem, 1986; (323):865
55 黄素梅，宋兴尧等．厦门大学学报（自然科学版），1987；26(2):216
56 周　聪．光谱学与光谱分析，1996；16(4):48
57 金龙珠，吴淼尘，倪哲明．化学学报，1987；45(8):808
58 李锦霞，KW约翰逊，黄志成．环境科学，1986；7(6):75
59 赵志强，逄振杰，窦安全．海洋环境科学，1987；6(2):89
60 Shengjun M, Holcombe J A. Anal Chem 1990; (62):1994
61 Mo S, Holcombe J A. Talanta, 1991; (38):503
62 李玫科等．分析测试通报，1991；10(5):11
63 叶曼华等．上海钢研，1993；(4)：46
64 Shang-da Huang et al. Spectrochim Acta, 1993; 48B(12):1451
65 Han Chuang et al. Spectrochim Acta, 1994; 49B(3):283
66 Voellkopt V, Grobenski Z, Welz B. At Spectrosc, 1983; (4):165
67 Shan X, Ni Z, Zhang L. Talanta, 1984; (31): 150
68 单孝全，倪哲明．化学学报，1979；(37):261
69 Shan Xiaoquan et al. Talanta, 1984; (31): 150
70 倪哲明．光谱学与光谱分析，1985；5(6):2
71 容炳池，黄祖安．分析试验室，1983；2(2):35
72 罗方若．分析光学，1987；15(6):576
73 魏复盛，李浩．光学与光谱技术，1986；7(3):23
74 潘迎全，韩中豪，顾小珍．中国环境监测，1987；3(1):35
75 潘迎全，顾小珍，支克正．中国环境监测，1986；2(3):22
76 潘娟瑛，王志伟，陈恒武．光谱学与光谱分析，1996；16(3):106
77 孙　敏，赵曦白，苏致兴．地质实验室，1986；2(4):271
78 孙　敏，赵曦白，苏致兴．兰州大学学报，1986；22(3):79
79 刘革立．岩矿测试，1991；10(增刊):18
80 Gerardi M, Pelliccia G A. At Spectrosc, 1983; (4):193
81 Criaud A, Gouillac C. Anal Chim Acta, 1985; (167):257
82 林文业等．理化检验（化），1992；28(3):51
83 徐大源等．分析测试学报，1994；13(3):54
84 张桂恩．分析化学，1991；19(6):732
85 Hahn R, Ikramuddin M. At Spectrosc, 1985; (6):77
86 Webster J, Wood A. Analyst, 1984; (109):1255
87 孙世荣．分析化学，1986；14(7):494
88 徐伯兴，徐通敏，沈铭能．痕量分析，1985；(3/4):66
89 徐伯兴，徐通敏，沈铭能．分析化学，1986；14(8):623
90 吴奇藩等．分析化学，1992；20(4):407
91 Hasan M Z, Kumar A. Indian J. Environ Health, 1983; (25):161
92 何铭慈．岩矿测试，1987；6(4):250
93 高生泉．分析测试通报，1987；6(1):60
94 Landsberger S, Jervis R E, Aufreiter S, et al. Chenosphere, 1982; (11):237
95 故敬雍，石赛玉．光谱学与光谱分析，1986；6(5):57
96 王金涧，崔贞姬．分析化学，1983；11(8):612
97 杨成隆等．痕量分析，1993；9(1—2):32
98 Apte S C, Gunn A M. Anal Chim Acta, 1987; (193):147
99 Lindahl D C, Voight K C, Bishop A M, et al. At Spectrosc, 1984; (5):137

表 8-6　石墨炉原子吸收法测定地质矿产、有色金属样品

测定元素	方法说明	基体	文献
Au、Pd	煮解，萃取	地质样	1
Au	探针技术	地质样	2
Au	钨丝电沉积	地质样	3
Au	泡塑吸附，DMF解脱	地质样	4
Au	MIBK萃取	地质样	5
Au	MIBK萃取，$SnCl_4$为MM①	地质样	6
Au	泡塑吸附，涂锆	地质样	7
Au	不富集，Pd为MM	地质样	8
Au	Hg作MM	地质样	9
Au	双硫腙MIBK萃取	地质样	10
Au	$Cu(NO_3)_2$为MM	地质样	11
Au	涂Zr石墨管	地质样	12
Au、Ag	泡塑富集	地质样	13
Au、Ag	泡塑富集，Ni作MM	地质样	14
Au	聚醚型泡塑富集	地质样	15、16
Ag	钨丝电解预富集	地质样	17、18
Ag	STPF技术	地质样	19
Au,Ag,In,Ga	溶液萃取连续测定	地质样	20
Ag	钨丝电沉积	地质样	21
Ag	巯基棉分离	地质样	22
Ag	V形舟	地质样	23
Ag	平台	地质样	24
Ag	硫脲+$NH_4H_2PO_4$为MM	地质样	25
Ag	碲作MM	地质样	26
Ag	悬浮进样	地质样	27、28
Ag	EDTA+Fe+Ca作MM	地质样	29
Ag	EDTA+Fe+Ca+HNO_3作MM	地质样	30
As	Mg+Mn作MM	地质样	31
Ba	涂钽	地质样	32
Be	涂钽	地质样	33
Bi	探针技术	地质样	34
Cd	钽处理石墨杯	地质样	35
Cd、Pb、Ag	平台，$NH_4H_2PO_4$为MM	地质样	36
Cd	KH_2PO_4作MM	地质样	37
Cd	Pd+NH_4F作MM	地质样	38
Cd、Pb	$NH_4H_2PO_4$作MM	地质样	39
Ga、In、Tl、Ge、Ag、Cd	HCl-碘化物萃取	地质样	40
Ga	平台	地质样	41
Ga	探针原子化	地质样	42
Ga、Tl	以琼脂作为悬乳剂	地质样	43
Ge	平台，$Mg(NO_3)_2$为MM	地质样	44
In	探针原子化	地质样	45
In	HI介质萃取，Cr^{3+}为MM	地质样	46
Ni	钒酸铵作MM	地质样	47
Pb	平台，$NH_4H_2PO_4$为MM	地质样	48
Pb,Cd	考察基体干扰	地质样	49
Pd	2-巯基苯并噻唑萃取STPF	地质样	50
Pd	泡沫塑料富集	地质样	51
Pt,Pd	离子交换得到Pd	地质样	52
Pt,Pd	N263萃取分离	地质样	53
Pt,Pd	*N*-正辛基苯胺-间二甲苯萃取	地质样	54
Pt,Pd,Au	阴离子交换分离	地质样	55
Pt,Pd,Au	泡塑分离	地质样	56
Pb,Cs	K、Na混合作MM	地质样	57
Rh、Se、Ba	在HF、H_2SO_4中溶解	地质样	58
Sb	Pd作MM	地质样	59
Sb	探针原子化	地质样	60
Sb	悬乳进样、探针原子化	地质样	61
Se,Te	共沉淀，Ni作MM	地质样	62
Se,Te	MIBK萃取，Pd+Ni作MM	地质样	63
Sn	熔化，NH_3作MM	地质样	64
Sn	探针原子化	地质样	65
Sn	悬乳进样，探针原子化	地质样	66
Sr	EDTA盐作MM	地质样	67
Te	HCl介质，MIBK萃取，Rh为MM	地质样	68
Tl	泡塑富集	地质样	69,70,71
Tl	萃取分离	地质样	72
稀土元素	$HClO_4$、HF煮解	地质样	73
Au	萃取和预沉淀	矿石	74,75
Au	泡塑吸附	矿石	76,77
Au,Pt,Pd	叔胺泡沫塑料富集	矿石	78
Ag	富集	矿石	79
Ag	$NH_4H_2PO_4$-硫脲作MM	矿石	80
Ag	TOA柱色层萃取	矿石	81
Ag,Pt,Pd	*N*-正辛基苯胺萃取	矿石	82
As,Se,Cr,Co,Ni	平台，zeeman	矿石	83
Ba,Sr,Cd	Fe作MM	矿石	84,85
Ce	Ti涂层	矿石	86
Ga	MIBK萃取	矿石	87
Ge	MIBK萃取，Ni作MM	矿石	88
In	W涂层	矿石	89
In,Cd,Ga	阳离子交换树脂富集	矿石	90
P	Zr涂层，zeeman	矿石	91
Pb	zeeman，L'VOV	矿石	92
Sn	W-涂层	矿石	93
Sn(痕量)	磷钼酸铵作MM	矿石	94
Sn	—	矿石	95
Sn	*N*-苯酰基-*N*-苯基羟胺萃取	矿石	96
Tl	—	矿石	97,98
V	—	矿石	99
Yt,Ho,Dy,Tb	—	硅矿石	100
Sn	—	硅矿石	101
U	W-平台	硅矿石	102
Co,Ni	NH_4F作干扰抑制剂	硅矿石	103
Cu	100%甘油悬乳	硅矿石	104
各种元素	石墨粉稀释	硅矿石	105
Bi	—	硫矿	106
Sc,La	—	火成岩	107
Y,Sc	Ta涂层	稀土矿	108
Sb	Ni作MM	岩石土样	109
Au	涂La，平台	黄铁矿	110
Se	La作MM	钛铁矿	111
Cd,Zn,Mn	NH_4/磷酸盐作MM	硅藻土	112

续表

测定元素	方法说明	基体	文献
Rb	固体进样	花岗岩	113
Au,Pd,Ag	—	废铜	114
As,Sb,Bi	—	铜	115
Te	石墨平台	纯铜	116
Ag	zeeman B C	铜	117
18 种元素	—	银	118
Cu,Ag	zeeman 石墨杯	锡锭	119
Bi	石墨杯	锡	120
Fe, Ca（痕量）	—	纯钢	121
Zn	选择性溶解富集	超纯镓	122
Sn	Mo 为 MM	镓	123
Rh,Ir	阳离子表面活性剂浮选分离	纯铂	124
Ni,Cr,Mn	—	高纯铁	125
Cs	无水溶剂选择性萃取	钠	126
Ru	TNA 萃取分离	金属铱	127
Fe, Al, Cu, Ni, Cr, Ag, Mn,Co,Si	真空蒸馏	高纯汞	128
V	$Na_2O_2 + K_3[Fe(CN)_6]$作 MM	纯铁	129
Al	$(NH_4)_2HPO_4$ 作 MM	高纯铁红	130
Cu	—	铅	131
Si	含水标定	金	132
Bi	Pd 作 MM	高纯 Ni,Cu	133
Fe, Al, Ni, Cr, Cu, Ag, Mn	真空蒸馏	高纯镉、碲	134
Ta	—	铁铌合金	135
As, Sb, Se, Te	—	镍合金	136
Se	Pd 作 MM	镍合金	137
Sn	超声波浸渍法涂锆和钼	铝合金	138
Mg	La 为 MM	铝合金	139
Ge	石墨粉作 MM	铝合金	140
Al, Ba, Ca, Pb, Mg, Ag	—	铁合金	141
Cu, Mn, Ag, Pb	—	钢	142
Cr	Ta 舟	钢	143
As, V, Ni, Co	—	钢	144
Te	Ni 作 MM	钢	145
Al	钼涂层，平台	钢	146
Sn	柠檬酸作 MM	钢	147
B	镀锆管，镍-锆二元 MM	钢铁	148
As, Sb, Sn	—	钢	149
Sn	涂钨，抗坏血酸作干扰抑制剂	铜锌合金	150
Pb, Te, Bi（微量）	—	银铜合金	151
Pb	石英管原子俘获	铜合金	152
Ag,Au,Bi, Cu, Pd	—	铅合金	153
Si	Pd 作 MM	低合金钢	154
Bi	固体进样	镍基合金	155
Pb	固体进样	镍基合金	156
Hf	—	合金	157
Pb, Cd, Ag	—	砷化镓	158
Pb, Sb	—	铸铁	159

① MM 代表基体改进剂。

本表参考文献：

1 Kontas E, Niskavaara H, Virtasalo J. Geostand Newsl, 1986; (10):169
2 侯书恩，常诚．分析化学，1989；17(12):1116
3 马光正，王亚慧．分析实验室，1988；7(5):11
4 丁耀炜．地质实验室，1989；5(1):28
5 向一明，王克初，林珊女．地质实验室，1988；4(6):363
6 涂余如，袁明华．痕量分析，1988；4(2):37
7 彭瑞兴．痕量分析，1988；4(1):55
8 涂余如，袁明华．分析化学，1989；17(5):480
9 袁明华，罗广福等．理化检验（化），1989；25(4):217
10 于凤莲．分析测试通报，1990；9(1):47
11 曾晓斌，龙泉生，钟牧兰．光谱学与光谱分析，1991；11(4):39
12 邵文军．岩矿测试，1991；10(增刊):29
13 方以规等．分析试验室，1991；10(1):38
14 王继森，赵建国．分析测试通报，1991；10(4):56
15 袁园．岩矿测试，1993；12(3):194
16 甯中利等．光谱学与光谱分析，1994；14(5):73
17 苏庆平，熊绍继等．痕量分析，1985；(3/4):82
18 苏庆平，熊绍继等．地质实验室，1986；2(3):214
19 罗方岩，吴圣葵．分析化学，1987；15(8):739
20 余煜棉，张俊浩，莫胜均．光谱学与光谱分析，1995；16(3):99
21 张　晶，任选凡．理化检验（化），1989；25(6):336
22 张菊芬，周咏德．地质实验室，1989；5(3):148
23 郑衔生，向　阳．地质实验室，1988；5(4):187
24 张菊芬，周咏德．地质实验室，1989；5(3):146
25 史青戈．岩矿测试，1988；7(2):37
26 何铭慈．岩矿测试，1988；7(2):133
27 陈友炜．岩矿测试，1991；10(4):291
28 张異等．光谱学与光谱分析，1992；12(5):83
29 冯子勇，李镒生等．分析测试学报，1993；12(2):57
30 冯子勇等．分析测试学报，1994；12(2):57
31 胡圣虹，祝墙明．岩矿测试，1991；10(增刊):12
32 李彬贤，张　巽．岩矿测试，1988；7(2):(4)
33 卢荫庥．地质实验室，1988；4(1):20
34 常　诚，侯书恩．岩矿测试，1989；8(1):4
35 卢荫庥．理化检验（化），1989；24(4):225
36 陈友炜．光谱学与光谱分析，1990；10(5):66
37 来聘华，马　玲等．理化检验（化），1991；27(3):182
38 韩秀爱．岩矿测试，1991；10(增刊):30
39 Dolinsek F, Stupar J, Vrscaj V. J Anal At Spectrom, 1991; (6): 653
40 郑民奇，刘敬华．地质实验室，1989；5(6):336
41 韩恒斌，倪哲明．分析化学，1983；(11): 571
42 林守麟，侯书恩等．分析试验室，1991；10(1):35
43 张佩瑜等．岩矿测试，1994；13(2): 96
44 王克初，向一明．光谱学与光谱分析，1988；8(6):55
45 林守麟，郝艾清等．分析化学，1990；18(11):996
46 方以规，史洪英．冶金分析，1990；10(5):66
47 高振宗，李玉琴．冶金分析，1992；12(2):18
48 姚金玉，蒋永清．光谱学与光谱分析，1991;11(3):45

49 杨　芃．光谱学与光谱分析，1992；12(1)：116
50 徐培方，侯贤灯，罗方若．分析化学，1988；16(12)：1092
51 刘　澜．光谱实验室，1993；10(3)：23
52 Branch C H，Hutchison D J．Anal At Spectrom，1986；(1)：433
53 马自荣，梁述廷．地质实验室，1989；5(3)：142
54 陈友炜，宋金明．光谱学与光谱分析，1989；9(1)：48
55 沈镜璇．岩矿测试，1990；8(4)：272
56 丁耀炜．冶金分析，1990；10(2)：46
57 张明仁，胡吉顺．岩矿测试，1988；7(2)：119
58 Sen Gupta J G．Talanta，1987；(34)：427
59 Niskavaara H，Virtasalo J，Lajunen L H．J Spectrochim Acta，13，1985；(40B)：1219
60 侯书恩，常　诚．光谱学与光谱分析，1989；9(5)：38
61 侯书恩，常　诚．分析试验室，1991；10(2)：7
62 邵永添，胡善寅．分析测试通报，1984；3(3)：53
63 王万美等．岩矿测试，1994；13(2)：125
64 Lundberg E，Bergmark B．Anal Chim Acta，1986；(188)：111
65 侯庆烈．分析试验室，1987；6(2)：10
66 侯书恩．光谱学与光谱分析，1991；11(4)：43
67 郑衍生，周采菊．岩矿测试，1992；11(3)：236
68 张佩瑜，金义．岩矿测试，1990；9(2)：128
69 卢荫庥，丁莎．地质实验室，1987；3(3)：177
70 侯嘉丽．分析试验室，1988；7(3)：62
71 罗方若等．分析化学，1989；17(12)：1122
72 贾大增，蒋恒智．分析试验室，1988；4(5)：299
73 Juras S J，Hickson C J，Horsky S J，et al．Chem Geol，1987；(64)：143
74 Sta filov T，Todorovski T．At Spectrosc，1987；(8)：12
75 Benedotti M F，De Kersabiec A M，Boulegue J．Geostand Newsl，1987；(11)：127
76 路庆祥．冶金分析，1987；7(6)：55
77 李淑兰，王仁寿．黄金，1987；(6)：58
78 王继森，王忠发．理化检验（化），1987；23(3)：146
79 Donaldson E M，Mark E，Leaver M E．Talanta，1984；(31)：89
80 黄石玉．岩矿测试，1987；4(1)：23
81 伍孝全．岩矿测试，1986；5(3)：247
82 陈友炜．痕量分析，1985；(3/4)：80
83 Pruszkowska E，Barrett P．Spectrochim Acta PartB，1984；(39B)：485
84 丁耀炜．分析化学，1988；16(1)：95
85 吴柏如等．光谱学与光谱分析，1985；5(1)：57
86 Sen Gupta J G．Talanta，1984；(31)：1053
87 郑民奇．分析化学，1987；15(11)：1032
88 郑民奇．地质实验室，1987；3(4)：257
89 Zhou L，chao T T，Meier A L．Anal Chim Acta，1984；(161)：369
90 许继廷，黄会平．地质实验室，1987；3(4)：250
91 Casetta B，Giaretta A et．el．At Spectrosc，1986；(7)：155
92 Grobenski Z，Lehmann R．At Spectrosc，1983；(4)：111
93 Zhou L，Chao T T，Maier A L．Talanta，1984；(31)：73
94 向守贤．分析试验室，1983；(4)：12
95 容炳池，黄玉娟．分析试验室，1983；2(5)：26
96 Volynskii A B，Sedykh E M，Spivakov B Y et al．Anal Chim Acta，1985；(177)：129
97 郑民奇．岩矿测试，1986；5(4)：282
98 胡吉顺．岩矿测试，1986；5(2)：118
99 陈友炜，刘　勇．岩矿测试，1987；6(2)：116
100 Mazzucotelli A，Galli M，Frache R．Analyst（London），1982；(107)：104
101 Subramanian K S．Int Lab，1981；(11)：32，34
102 Hamm U，Baechmann K．Fresenius'Z．Anal Chem，1983；(315)：591
103 Kuroda R，Nakano T，Miara Y，oguma K．J Anal At Spectrom，1986；(1)：429
104 Isozaki A，Sasaki H，Furukawa A，Utsumi S，Bunseki Kagaku 1990；(39)：43
105 Nakamura T，Oka H，Morikawa H et at．Analyst，1992；(117)：131
106 Nakahara T．Bull Univ Usaka Prefect，Ser A，1982；(31)：57
107 Sen Gupta J G．Anal Chim Acta，1982；(138)：295
108 Sen Gupta J G．Talanta，1985；(32)：1
109 刘红艳，程信良．光谱学与光谱分析，1995；15(3)：103
110 赵铁荣，云秀英．分析试验室，1983；(4)：9
111 范健等．光谱实验室，1993；10(5)：29
112 Garcia I L，Cortez J A，Cordoba M H．Anal Chim Acta，1993；(283)：167
113 张宝川，边华．分析化学，1987；15(4)：330
114 Persiani C，Durkin F．At Spectrosc，1982；(3)：194
115 Castillo J R，Lopez-Molinero A，Sucunza T．Mikrochim Acta，1986；(4)：105
116 王宁鸥，朱磐石．光谱实验室，1986；3(4)：108
117 Pauwels J，De Angelis L，Peetermans F et at．Fresenius' J Anal Chem，1990；(337)：290
118 Kulish N G，Burylev B P．Zavod Lab，1983；(49)：37
119 Takada K．Bunseki Kagaku，1983；(32)：197
120 Takada K，shoji T．Fresenius'Z Anal Chem，1983；(315)：34
121 李绍南，潘永祺．分析试验室，1982；1(1)：31
122 陈家英等．稀有金属，1985；4(4)：63
123 Sahayam A C，Gangadharan S．At Spectrosc，1993；(14)：83
124 俞志鹤，黄慧明．分析试验室，1987；6(11)：12
125 李报厚．化工冶金，1988；9(1)：86
126 Hatterer A，Walter S．Analusis，1987；(15)：552
127 李赛君，孙小华．光谱学与光谱分析，1990；10(1)：61
128 杨似燕．理化检验（化），1990；26(1)：22
129 杨维秀．冶金分析，1992；12(5)：47
130 李静玲．岩矿测试，1991；10(增刊)：14
131 黄志英等．理化检验（化），1994；30(2)：81
132 Hinds M W，Kogan V V．J Anal At Spectrom，1994；(9)：451
133 李报厚．冶金分析，1988；8(1)：41
134 杨似燕，贾沛民，杜美蓉．分析试验室，1987；6(9)：63
135 Janousek I．Fresenius'Z Anal Chem，1983；(315)：248
136 Headridge J B，Nicholson R A．Analyst(London)，1982；(107)：1200
137 姚金玉等．分析化学，1993；21(7)：846
138 林守麟等．分析试验室，1986；5(1)：22
139 Pandey L P，Gupta K K，Jha S N et al．Fresenius'z Anal Chem，1988；(329)：795
140 Awad N A N，Jasim F．Microchem J，1989；(40)：187
141 Rains T C．ASTM Spec Tech Pub，1981；(747)：43
142 Takada K，Hirokawa K．Fresenius'Z Anal Chem，1982；(312)：109
143 Mohammed D A．Analyst，1987；(112)：209
144 杨似燕，贾沛民．理化检验（化），1987；23(3)：158
145 唐恩进，黄治勤，张光辉．冶金分析，1989；9(6)：31

146 杨宝贵．理化检验（化），1990；26(6)：364
147 蔡伯圣，宣维康．冶金分析，1992；12(3)：23
148 刘永铭等．光谱学与光谱分析，1995；15(1)：75
149 许忠玲，周宗学．冶金分析，1992；12(5)：45
150 李报厚，李秀容．冶金分析与测试（分），1985；5(1)：39
151 张泰松．分析试验室，1986；5(8)：4
152 Burns D T, Atkinson G D, Chimpalee N et al. Fresenius' Z Anal Chem，1988；(331)：814
153 Danz H J, Jackwerth E. Fresenius' Z Anal Chem，1987；(326)：57
154 考尚铭，林铁铮．光谱学与光谱分析，1991；11(4)：36
155 罗 川，赵世荣，洪志明．冶金分析，1989；9(3)：26
156 赵世荣，刘广新等．理化检验（化），1989；25(1)：11
157 Abbasi S A. Anal Lett，1988；21(4)：653
158 蔡绍勤，潘书慧．分析试验室，1987；6(2)：1
159 渠荣遴，孟庆英等．理化检验（化）1987；23(6)：352

表 8-7 石墨炉原子吸收法测定生物样品

测定元素	方法说明	基体	文献	测定元素	方法说明	基体	文献
Al	—	全血	1	Pb		全血	44，45，46，47，48
Al	zeeman	全血	2	Pb	Triton X，磷酸盐为 MM	全血	49
Al	Zr 涂管	全血	3	Pb（痕量）	Pt、Pd 为 MM	全血	50
Al	平台	全血	4	Pb	NH_3，$NH_4H_2PO_4$，$(NH_4)_2HEDTA$ 为 MM	全血	51
Al	$Mg(NO_3)_2$ + Triton X 为 MM①，L'VOV	全血	5	Pb	螯合萃取	全血	52
Al	STPF	全血	6	Pb	硝化脱质 $NH_4H_2PO_4$ 为 MM	全血	53
Al	$K_2Cr_2O_7$ 为 MM	全血	7	Pb	Ni 作 MM	全血	54
Ag	—	全血	8	Pb	Cu、Mg 作 MM，平台	全血	55，56，57
As	Triton X + $Ni(NO_3)_2$ 为 MM	全血	9	Pb	平台，MM	全血	58
As	灰分温度，MM 作用、分析	全血	10	Pb，Cd，Cr	铵盐作 MM	全血	59
Al，Cr，Co，Fe，Ni	煮解后加入 Triton X	全血	11	Se	Ni，Pt 为 MM	全血	60
Bi	—	全血	12	Se	Pd-抗坏血酸为 MM	全血	61
Ca，Mg	超滤分馏	全血	13	Si	—	全血	62
Cd-Zn	高血压与正常人比较	全血	14	Sn	KNO_3 作 MM，标准加入法	全血	63
Cd-Pb	—	全血	15	Zn	—	全血	64，65，66，67，68，69，70，71
Cd	硝化除去蛋白质	全血	16	Zn	NH_4NO_3 + $Mg(NO_3)_2$ 为 MM	全血	72
Cd	$Pd(NO_3)_2$ + NH_4NO_3 为 MM	全血	17	Al	—	血清	73
Cd	HNO_3+H_2O_2 煮解	全血	18	Al	蛋白质结合	血清	74
Cd，Pb	衬钽管，MM	全血	19，20	Cr	干扰研究，池比较	血清	75
Cd	共沉淀预富集	全血	21，22	Cr	—	血清	76
Cr	$Mg(NO_3)_2$ 灰化	全血	23	Cr	角型平台	血清	77
Cr	Triton X—100	全血	24，25	Cr，Mn	HNO_3 + Triton X—100 稀释	血清	78
Cr	酶降解，zeeman	全血	26	Cu	—	血清	79，80，81
Cr，Mn	—	全血	27	Cu，Mn	—	血清	82
Cu	zeeman	全血	28	Fe	—	血清	83
Cu	平台	全血	29	Mn，Pb	Triton X—100 稀释	血清	84
Au	Ni 和 Pd-Mo 为 MM	全血	30	Ge，Sr	Pd 热解预处理，平台	血清	85
Cu，Fe，Zn，Mg，Pb	—	全血	31	As	Triton X—100，Pd 为 MM	血清	86
Fe	—	全血	32	Pd	钨丝电解沉积	血清	87
Li	Triton X—100	全血	33	Mn，Ni，Co，Cr	HNO_3 + Triton X—100 稀释	血清	88
Li	平台	全血	34	Se	ZBC Ag + Cu + Mg 为 MM	血清	89
Li	Triton X—100	全血	35	Ge	$Ca(NO_3)_2$ 为 MM	血浆	90
Li	涂 Ta，NH_4NO_3 为 MM	全血	36	Co	MM 的比较	血浆	91
Mn		全血	37				
Mn	Triton X—100，没有除去蛋白质	全血	38				
Mn	平台	全血	39				
Ni	zeeman	全血	40				
Ni	草酸铵为 MM	全血	41				
Ni	zeeman	全血	42				
Ni	APDC-DDTC-MIBK 萃取	全血	43				

续表

测定元素	方法说明	基体	文献
Cu-Zn	—	血浆	92,93
Cu	—	透析液	94
Al	基体干扰研究	透析液	95
Cd,Co,Cr,Ni,Pb,Se	—	猪全血	96
As	Ni 和 HNO_3 的影响	尿液	97
As	zeeman,Ni,Mg 为 MM	尿液	98
Be	STPF, $Mg(NO_3)_2+HNO_3+$Triton X－100 为 MM	尿液	99
Be	磷钼酸铵为 MM	尿液	100
Cd	—	尿液	101,102,103,104
Cd	2%HNO_3	尿液	105
Cd	检测基体的影响	尿液	106
Cd	平台和管比较,HNO_3 为 MM	尿液	107
Cd	$(NH_4)_2HPO_4$-HNO_3 为 MM	尿液	108
Cd	衬钽管 $(NH_4)_2HPO_4+HNO_3$ 为 MM	尿液	109
Cr	糖尿病人	尿液	110
Cr	—	尿液	111,112,113,114,115
Cr	zeeman,CBC	尿液	116
Co	zeeman, $Mg(NO_3)_2+HNO_3$ 为 MM	尿液	117
Hg	Au 涂管,预热	尿液	118
Hg	Pd＋HNO_3 作 MM	尿液	119
Mn	直接测定	尿液	120
Ni	zeeman	尿液	121
Ni,Cr	直接稀释	尿液	122
Pb,Sb	—	尿液	123
Pb,Cr	平台	尿液	124
Pb	磷酸盐作 MM,平台	尿液	125
Pb	Pd,Pt 为 MM	尿液	126
Pb	zeeman,平台	尿液	127
Pb	萃取	尿液	128
Pb	探针进样技术	尿液	129
Sb	Ni 作 MM	尿液	130
Sn	阳极清洗＋离子交换	尿液	131
Tl	zeeman 没有预处理	尿液	132
V	—	尿液	133
V	预热石墨管	尿液	134
痕量元素	—	尿液	135
Li	H_3PO_4/NH_4NO_3 为 MM	唾液	136
Cu	平台,$HNO_3+NH_4NO_3$ 为 MM	唾液	137
Cr,Mn	Pd 为 MM	眼液	138
Zn,Cu	$NH_4NO_3+Mg(NO_3)_2$ 为 MM	人精子	139
K,Na	—	体液	140
Se	Pt-Ni 为 MM	精液	141
Se	Pd-Mg 为 MM	人乳	142
Ca,Cu,Fe,Mg,Mn,Zn	—	关节液	143
Cu,Zn	—	人发	144
Cd,Pb	—	人发	145
Se	Cu-Fe 混合作 MM	人发	146
Pb,Mn	四甲基氢氧化铵溶解	人发	147
Hg	Pd 为 MM	人发	148
Cr	与消化体系比较	人发	149
Cr(痕量)	非全消化-悬浮液进样	人发	150
Cu	有机碱分解样品	人发	151
Cd,Cr,Cu,Mn	—	人发	152
As	Pd/Mg 为 MM	人发	153
Pb	—zeeman	鱼	154,155
Co	萃取,zeeman	鱼	156
Mo	煮解和萃取	鱼	157
As	Ni 作 MM	鱼	158
Cu,Zn,In,Cd	—	生物组织	159
Pt	NH_2OH 为 MM	生物组织	160
Al	zeeman	生物组织	161
Au	zeeman	生物组织	162
Mn	—	生物组织	163
Tl	平台,氘灯消背景	生物组织	164
Al,Cd,Pb	STPF	生物组织	165
Se,As	$Ni(NO_3)_2$ 为 MM	生物组织	166
Cd	磷酸铵为 MM	生物组织	167
Pb	抗坏血酸为 MM	生物组织	168
Pb,Cu,Mn	zeeman B C	生物组织	169
Se	zeeman B C,管中杯 Pd 为 MM	生物组织	170
Se	Pd 为 MM	生物组织	171
Cd,Cu,Pb,Zn	—	生物组织	172
Ag,Cu,Fe,Mn,Pb,Zn		生物组织	173
Se	管中杯,Cu/Pd 为 MM	生物组织	174
Co,Ni,Mn,Pb	预先灰化	生物组织	175
Al	有机碱溶解	小白鼠组织	176
Be	—	骨	177
Cd,Pb	—	牙齿	178
Cd,Pb	二次取样	牙齿粉末	179
Ag	zeeman	牛肝	180
Cr	—	牛肝	181
微量元素	—	牛肝	182
Se	Ni＋Ag 为 MM	肝	183
Cd,Pb	$NH_4H_2PO_4$ 为 MM	肝	184
Pb,Se,Cr,Mo	微波溶样	猪肝	185

续表

测定元素	方法说明	基体	文献
Mo	BaF_2 为 MM	人肝	186
Cu	管中杯，Mg/Pd 为 MM	肝标本	187
Se	悬乳进样	猪肝	188
Cd	直接分析	胎盘	189
Pb,Cd	zeeman	肾组织	190,191
微量元素	—	肿瘤组织	192
Pt	Pt-DNA 结合定量	DNA	193
Cd,Pb	zeeman B C	鸟羽	194
Cu,Fe,Ni	涂铌	脂肪和油	195
Cd,Pb,Cr,Ni,Hg	zeeman B C	尿结石	196
Pb	—	肌肉	197
Ni,Al	固体进样	皮肤	198
Fe,Ni	超声波自动进样	脂肪	199
Pb,Cd,Cu	$NH_4H_2PO_4$ 为 MM	贻贝	200
As	Pd/Mg 为 MM	贻贝	201

① MM 代表基体改进剂。

本表参考文献：

1 Gardiner P E, Stoeppler M, Nuernberg H W. Analyst, 1985; (110): 611
2 Guillard O, Tiphanean K, Reiss D et al. Anal Lett, 1984; (17): 1593
3 Costantini S, Giordano R, Vernillo I. Microchem, J, 1984; (30): 425
4 Bettinelli M, Baroni U, Fontana F et al. Analyst, 1985; (110): 19
5 Fagioli F, Locatelli C, Gilli P. Analyst, 1987; (12): 1229
6 Slavin W. Spectrochim Acta B, 1987; (42B): 933
7 Shan X, Luan S N Z. J Anal At Spectrom, 1988; (3): 99
8 Vince D G, Williams D F. Analyst, 1987; (112): 1627
9 Eaton D K, Mc Cutcheon J R. J Anal Toxicol, 1985; (9): 213
10 Subramanian K S. J Anal At Spectrom, 1988; (3): 111
11 Lugowski S, Smith D C, Van Loon JC. J Biomeel Mater Rev, 1987; (21): 657
12 Bertholf R L, Renoe B W. Anal Chim Acta, 1982; (139): 287
13 Danielson B G, Pallin E, Sohtell M. Upsala J Med Sci, 1982; (87): 43
14 Paniholzer M, Raptis S E, Mueller K. Mikrochim Acta, 1982; (2): 189
15 Claeys-Thorean F. At Spectrosc, 1982; (3): 188
16 Black M M, Fell G S, Ottaway J M. J Anal At Spectrom, 1986; (1): 369
17 Yin X F, Schlemmer G, Welz B. Anal Chem, 1987; (59): 1462
18 Roberts C A, Clark J M. Bull Environ Contam Toxicol, 1986; (36): 496
19 陈淑怡，宋 力. 分析测试通报，1988; 7(3): 56
20 郭小珠. 理化检验（化），1989; 25(6): 346
21 董立平，方肇伦. 分析试验室，1992; 11(6): 5
22 Fang Zhaolun, Dong Liping. J Anal Atom Spectrom, 1992; 7(2): 439
23 Veillon C, Patterson K Y, Bryden N A. Anal Chim Acta, 1984; (164): 67
24 Schermaier A J, O'Conner L H, Pear Son K H. Clin Chim Acta, 1985; (152): 123
25 Mc Aughey J J, Smith N J. Anal Chim Acta, 1987; (193): 137
26 Offenbacher E G, Dowling H J, Rinlco C J et al. Clin Chem, 1986; (32): 1383
27 冯大喧. 地质实验室，1988; 4(5): 302
28 Liska S K, Kerkay J, Pearson K H. Clin Chim Acta, 1985; (150): 11
29 Carelli G, Bergamaschi A, Altavista M C. At Spectrosc, 1984; (5): 46
30 Shan X, Egila J, Littlejohn D, Otlaway J M. J Anal At Spectrom, 1987; (2): 299
31 王 璘. 分析化学，1992; 20(4): 492
32 Favier A, Maljournal B, Decoux G et al. Ann Biol Clin (Paris), 1983; (41): 45
33 Bourret E, Moynier I, Bardet L et al. Anal Chim Acta, 1985; (172): 157
34 Moynier I, Bourret E, Fussellier M et al. Analusis, 1987; (15): 306
35 Rios C, Valero H, Sanchez, T. At Spectrosc, 1987; (8): 67
36 Luan S, Shan X, Ni Z J Anal At Spectrom, 1988; (3): 989
37 Favier A, Ruffleux D, Alcaraz A et al. Clin Chim Acta, 1982; (124): 239
38 Uchida T, Vallee B L. Anal Sci, 1986; (2): 71
39 Paschal D C, Bailey G G. At Spectrosc, 1987; (8): 150
40 Sunderman F W, Crisostomo M C, Reid M C et al. Ann Chlin Lab Sci, 1984; (14): 232
41 Wei F S, Qi WQ. Anal Lett, 1984; (17): 1607
42 Anderson J R, Gammelgaard B, Reimert S. Analyst, 1986; (111): 721
43 李晓春. 地质实验室，1988; 4 (6): 350
44 Del Rosario A R, Guirguls G N, P erez G P et al. Int J Environ Anal Chem, 1982; (12): 223
45 Fernandez F J, Hilligoss D. At Spectrosc, 1982; (3): 130
46 Herber R F M, Van Deyck W. Clin chim Acta, 1982; (120): 313
47 Kurfuerst U. Fresenius'Z Anal Chem, 1982; (313): 97
48 Shamberger R J J. Clin Chem Clin Biochem, 1983; (21): 107
49 Hasan M Z, Kumar A. Indian J Environ Health, 1983; (25): 191
50 孙汉文等. 原子光谱分析，1981; (1): 10
51 Shuttler I L, Delves H T. Analyst, 1986; (111): 651
52 Girgistakla P, Mohamed H A, Fahmy F. Analyst, 1987; (112): 1697
53 Subramanian K S. At Spectrosc, 1987; (8): 7
54 Paschall D C, Kimberly M M. At spectrocs, 1986; (7): 75
55 Sampson B I. Anal At Spectrom, 1987; (2): 447
56 Eckerlin R H, Hoult D W, Carnrick G R. At spectrosc,

1987; (8): 64
57 Neve J, Molle L. Acta Pharmacol Toxicol Suppl. 1986; (59): 606
58 史菊妹，邹孝芳. 理化检验（化），1986; 22(4): 246
59 曾得国. 分析化学，1991; 19(7): 封四.
60 Saeed K J. Anal At Spectrom, 1987; (2): 151
61 Knowles M B, Brodie K G. J Anal At Spectrom, 1988; 3(4): 511
62 Berlyne G M, Caruso C. Clin Chim Acta, 1983; (129): 239
63 张艳秋等. 光谱学和光谱分析，1992; 12(6): 71
64 Foote J W, Delves H T. Analyst (London), 1982; (107): 121
65 Foote J W, Delves H T. Analyst (London), 1983; (108): 492
66 Foote J W, Delves H T. Analyst (London), 1982; (107): 1229
67 Hong Z, Zhou J, Guo D. Zhonghua Yixue Jianyan Zazhi, 1982; (5): 226
68 Makino T. Clin Chem (Winston-Salem N C), 1983; (29): 1313
69 Matsuuras S. Kurume Med J., 1982; (29): 35
70 Shaw J C L, Bury A J, Barber A et al. Clin Chim Acta, 1982; (118): 229
71 Sprenger K B G, Franz H E. Clin Chem (Winston-Salem N C), 1983; (29): 1522
72 崔建升，赵 臻，蒋守规. 光谱学与光谱分析，1988; 8 (2): 63
73 何金兰. 分析化学，1987; 15 (5): 429
74 Blanco Gonzalez E, perez parajon J, Garcia Alonso J I et al. J Anal At Spectrom, 1989; (4): 175
75 Taylor A, Green P. J Anal At Spectrom. 1988; (113): 585
76 张艳秋等. 光谱学与光谱分析，1992; 12 (6): 71
77 赵云斌，余忠谊，杨晟. 理化检验（化），1993; 29 (1): 49
78 时彦等. 分析测试学报，1994; 13 (5): 42
79 邸 平，薛新国，江 森. 光谱学与光谱分析，1987; 7 (4): 45
80 唐文澄，许 伟，何 军. 中华医学检验杂志，1986; 9 (2): 104
81 冀正常等. 理化检验（化），1994; 30 (1): 38
82 林风山等. 微量元素与健康研究，1993; 10 (3): 52
83 黄慕琼. 分析化学，1982; 10 (11): 661
84 王道垣. 光谱实验室，1994; 11 (3): 65
85 时彦等. 分析试验室，1993; 12 (6): 58
86 马春琪，迟锡增，时彦. 光谱学与光谱分析，1996; 16 (5): 92
87 李银玉，高年强，黄浍泉. 光谱学与光谱分析，1988; 8 (12): 63
88 刘晓霞，毕瑰蓉. 光谱学与光谱分析，1995; 15 (1): 83
89 Morisi G, Partriarca M, Menotti A. Clin Chem (Winston-Salem N C), 1988; (34): 127
90 郭军华等. 光谱学与光谱分析，1993; 13(3): 57
91 Sampson B. J Anal At Spectrom, 1988; (3): 465
92 Hinks L J, Colmsee M, Delves H T. Analyst (London), 1982; (107): 815
93 Bahreyni-Toosi M H, Dawson J B, Chilvers D C et al. Trace Elem Anal Chem Med Biol Proc Int Workshop, 1982; (2): 811
94 Parra O E, Romero R A. At Spectrosc, 1987; (8): 105
95 Woolfson A C, Gracey Gillian M. Analyst (London), 1987; (112): 1287
96 冯济风等. 微量元素与健康研究，1993; 10 (4): 33
97 Puttemans F, Massart D L. Mikrochim Acta, 1984; (1): 261
98 Paschal DC, Kimberly M M, Bailey G G. Anal Chim Acta, 1986; (181): 179
99 Paschal D C. Bailey G G. At Spectrosc, 1986; (7): 1
100 Shan X, Yian Z, Ni Z. Anal Chim Acta, 1989; (217): 271
101 Heirich R, Angerer J. Trace Elem Anal Chem Med Biol, Proc Int Workshop, 1982; (2): 675
102 Panlholzer M, Raptis S E, Mneller K. Mikrochim Acta, 1982; (2): 189
103 Subramanian K S, Meranger J C, Mack cen J E. Anal Chem, 1983; (55): 1064
104 Van Deijck W, Herber R F. Clin Chim Acta, 1983; (128): 379
105 Feitsma K G, Franke J P, De Zeeuw R A. Analyst, 1984; (109): 789
106 Dungs K, Neidhart B. Analyst, 1984; (109): 877
107 Halls D T, Black M M, Fell G S et al J Anal At spectrom, 1987; (2): 305
108 Subramanian K S. Clin Chem, 1987; (33): 1298
109 陈淑怡，朱爱军. 光谱学与光谱分析，1991; 11 (6): 61
110 Ping L, Matsumoto K, Fuwa K. Anal Chim Acta, 1983; (147): 205
111 Halls D J, Fell G S. Elem Anal Chem Med Biol, Proc Int, Workshop, 1982; (2): 667
112 Minoia C, Mazzucotelli A, Cavalleri A et al. Analyst (London), 1983; (108): 481
113 Veillon C, Patterson K Y, Bryden N A. Clin Chem (Winston Salem N C), 1982; (28): 2309
114 Veillon C, Patterson K Y, Bryden N A. Anal Chim Acta, 1982; (135): 215
115 尤斯华，韩立路. 分析化学，1986; 14 (7): 529
116 Halls D J, Fell G S. J Anal At Spectrom, 1988; 3 (1): 105
117 Kimberly M M, Bailey G G, Paschel D C. Analyst, 1987; (112): 287
118 Ziegler E, Ziegler B. Fortschr Atomspelctrom Spurenanal, 1984; (1): 309
119 周 俊，余益民. 理化检验（化），1992; 28(6): 360
120 Deano P, Robinson J W. Spectrosc Lett, 1986; (19): 11
121 Sunderman F, William J, Hopfer S M et al. Ann Clin Lab Sci, 1986; (16): 219
122 Kiilunen M, Jarvisalo J, Makitie O et al. Int Arch Occup Suppl, 1986; (59): 613
123 Smith B M, Griffiths M B. Analyst (London), 1982; (107): 253
124 Mohi C, Ostapczuk P, Stoeppler M. Fortschr Atomspektrom Spurenanal, 1984; (1): 317
125 Paschal D C, Kimborly M M. At Spectr, 1985; (6): 134
126 Shan Xiaoquan and Ni Zheming. Can J Spectrosc, 1982; (27): 75
127 Lian L. Spectrochim Acta B, 1986; (41B): 1131
128 Arai F. Ind Health, 1986; (24): 139
129 Tianyu Chen et al. Analyst, 1993; 118 (5): 541
130 陈淑怡，朱爱军，陈 理. 光谱学与光谱分析，1992; 12 (4): 63
131 Weber G. Fresenius'Z. Anal Chem, 1985; (322): 311

132 Paschal D C, Bailey G G. J Anal Toxicol, 1986; (10): 252
133 Buchet J P, Knepper E, Lanwerys R. Anal Chim Acta, 1982; (136): 243
134 Apostoli P, Alessio L, Dal Farra M et al. J Anal At Spectrom, 1988; (3): 471
135 Verberke J S, Qing Yang et al. J Anal Atom Spectrom, 1990, (5): 399
136 Trapp George A Anal Biochem, 1985; (148): 127
137 Game I, Balabanoff L, Valdebenito R, Vivaldi L. Analyst 1986; (111): 1139
138 罗淑梅，王春杰，盛桂云. 分析化学，1989; 17 (10): 937
139 徐德选，杨根元，曹金星. 光谱学与光谱分析，1996; 16(6):87
140 Wingo C S, Bixler G B, Park C H et al. Kidney Int, 1987;;(31): 1225
141 Neve J, Chamart S, Trigaux P et al. At Spectrosc, 1987; (8):167
142 杨 芃，钱 蜀. 理化检验(化), 1992;28(3): 56
143 林昂如等. 微量元素与健康研究，1993; 10 (2): 20
144 Clanet P, De Antonio, S M, Katz S A et al. Clin Chem (Winston-Salem N C), 1982; (28): 2450
145 侯兰欣等. 分析试验室，1986; 5 (3): 34
146 王和悦，华佩冬，杨 英. 重庆大学学报，1987; 10 (2): 122
147 苏 旭，韦国铭. 分析测试通报，1990; 9 (2): 70
148 龙斯华，刘冬春. 光谱学与光谱分析，1989; 9 (2): 60
149 李赛君，张完白，颜鉴之. 理化检验（化），1988; 24 (4): 229
150 刘 春，严德忠，郑泽根. 分析试验室，1992; 11 (3): 43
151 粟文元，石荣义，徐民. 光谱学与光谱分析，1991; 11 (2): 52
152 韦正步等. 微量元素与健康研究，1993; 10 (3): 11
153 Koons R D, Deters C A. J Anal Toxicol, 1994; (18): 36
154 May T W, Brumbaugh W G. Anal Chem, 1982; (54): 1032
155 Wu Zhengke, Li Xia. BCEIA, 1985; Abstracts P. 380
156 Reznke W N, Knight J A, Sunderman F W. Am J Ind Med, 1987; (11): 419
157 Ericson S P, Mc Halsky M L, Jaselskis B. Talanta, 1987; (34): 271
158 纪登云等. 光谱学与光谱分析，1992; 12 (5): 101
159 Hudnik V, Marolt-Gomiscek M, Gomiscek S. Anal Chim Acta, 1984; (157): 143
160 Mutsumoto K, Solin T, Fuwa K. Spectrochim Acta, Part B, 1984; (398B): 481
161 Anderson J R, Reimert S. Analyst, 1986; (111): 657
162 Mathews D O, Mc Gaha M C. Spectrochim Acta B, 1987; (42B): 909
163 IUPAC Internation Union of Pure and Applied Chemistry Pure Appl Chem 1986; (58): 1307
164 Liloux MS, Nguyen P L, Claude J R. At Spectrosc. 1987; (8): 75
165 Stoeppler M, Mohl, C, Novak L, Gardiner P E. Fortschr Atomspektrom Spurenanal, 1986; (2): 419
166 Hoenig M, Yan Hoeyweghen P. Int. J Environ Anal Chem, 1986; (24): 193
167 Ebdon L, Lechotycki A. Microchem J, 1987; (36): 207
168 Ebdon L, Lechotycki A. Microchem J, 1986; (34): 340
169 Atsuya L, Itoh K, Akatsuka K. Fresenius'Z Anal Chem, 1987; (328): 338
170 Lindberg I, Lundberg E, Arkhammar P et al. J Anal At Spectrom, 1988; (3): 497
171 陈财树，陈雁玲. 光谱学与光谱分析，1990; 10 (3): 69
172 Schauenburg H, Weigert P. Fresenius'J Anal Chem, 1992; (342): 950
173 Byrd E D, Butcher D. J Spectrosc Lett, 1993; (26): 1613
174 Duan Y, Zhang H, Huo M et al. Spectrochim Acta B, 1994; (49B): 583
175 Atsuya I, Minami H, Zhang Q. Fresenius'J Anal Chem, 1993; (346): 1054
176 江 焱，邵 平. 光谱学与光谱分析，1992; 12 (1): 111
177 Nakashima R, Kamata E, Shibata S. Bunseki Kagaku, 1983; (32): T70
178 Nakamura T, Kusata T, Matsumoto H et al. Anal Biochem, 1995; (226): 256
179 Klein J, Schmidt H, Dirscheni C et al. Fresenius'Z Anal Chem, 1987; (328): 378
180 Julshamn K, Anderson K J, Vik H. Acta Pharmacol Toxicol Suppl, 1986; (59): 613
181 Steinen J W, Moy D C, Kramei H L. Analyst, 1987; (112): 1113
182 陈亚男. 食品科学，1986; (10): 27
183 Aadland E, Aaseth J, Radziuk B et al. Fresenius'Z Anal Chem, 1987; (328): 362
184 Besse A, Rosopulo A, Bosche C et al. Lp Spec Chromatgr/Speictrosk, 1987; 102～107
185 韩雪平，赵 瑾，蒋守规. 光谱学与光谱分析，1996; 16 (2): 58
186 曾得国. 理化检验（化），1993; 29 (1): 23
187 Aadland E, Aaseth J, Dahl K et al. J Trace Elem Electrolytes Health Dis, 1990; (4): 233
188 张在整等. 分析试验室，1994; 13 (2): 72
189 Herber R F M, Roelofsen A M, Hazelhoff Roelfzema W et al. Fresenius'Z Anal Chem, 1985; (322): 743
190 Luecker E, Rosopulo A, Kreuzer W. Fresenius'Z Anal Chem, 1987; (328): 370
191 Lucker E, Rosopulo A, Koberstein S et al. Fresenius' Z Anal Chem, 1987; (329): 31
192 王耐芬，杨 群，王小燕. 分析试验室，1986; 5 (9): 30
193 Reed E, Sauerhoff S, Poirier M C. Appl Spectrosc, 1988; (9):93
194 Hahn E, Hahn K, Mohl C et al. Fresenius'J Anal Chem, 1990; (337): 306
195 Capar S G. J Assoc off Anal Chem, 1990; (73): 320
196 Struebel G, Rzepka-Glinder V, Grobecker K H et al Fresenius'J Anal Chem, 1990; (337): 316
197 Luecker E, Thorius-Ehrler S. Fresenius'J Anal Chem, 1993; (346): 1072
198 Alder J F, Batoreu M C C, Dearse A D et al. J Anal At Spectrom, 1986; (1): 365
199 Van Dalen G, de Galan L. Spectrochim Acta B, 1994; (49B): 1689
200 Hu Q. Fenxi Huaxue, 1991; (19): 908
201 Ber mejo-Barrera P, Lovenzo-Alonso M J, Aboal-Somoza M et al. Mikrochim Acta, 1994; (117): 49

表 8-8　石墨炉原子吸收法测定植物和食品样品

测定元素	方法说明	基体	文献
As	样品分离比较	食品	1,2
As	样品分离	动物食品	3
As	MIBK 稀释	食用油	4
As	Ni-抗坏血酸为 MM	啤酒	5
As,Cd,Cu,Pb	—	食品添加剂	6
As	Pd,Ni 作 MM①	食品，饲料	7
As	Pd 为 MM	植物	8
Al	Triton X－100 为 MM	松针，叶子	9
Al	—	啤酒	10
Al	$Mg(NO_3)_2$ 为 MM	食品	11
Al	各种 MM	奶	12
Be	涂 Zr 管	植物	13
Ca,Mg,Sr,Si	—	盐	14
Cd,Pb	平台,zeeman	奶	15
Cd,Ni,Cr,Pb,Sb,Tl	平台,抗坏血酸为 MM	植物	16
Cd,Pb	—	粮食，茶叶	17
Cd,Pd,Cu	—	水生植物	18
Cd,Pb,Hg	—	海洋食品	19
Cd,Pb	钨丝电沉积	香菇	20
Cd	Pd 为 MM 与 $NH_4H_2PO_4$ 比较	食品	21
Cd,Cr,Pb	L'VOV 平台，$Mg(NO_3)_2$ 为 MM	粟,小麦,鸡蛋	22
Cd,Pb,Ni,Co	与涂层比较	烟叶	23
Cd	平台 L'VOV,Pd 为 MM	玉米	24
Cd,Co,Cr	—	天台乌药饮片	25
Cd,Pb	Pb 的 MM 为磷酸盐,Cd 的 MM 为 Pd/Cu	饼干，面包	26
Cd,Cu,Fe,Pb,Se	—	水果	27
Co,Ni,Cd	HNO_3-HClO_4 硝化	粮食	28
Co,Ag(痕量)	—	红松种子	29
Co	zeeman,直接测定	植物	30
Co	—	饲料，粮食	31
Co(痕量)	固体悬浮进样	饲料	32,33
Co,Ge,Mn,Mo,V	—	金花茶	34
Co,Ni	含水标定	食品	35
Cr,Ni	—	葡萄酒	36
Cr	涂 La 石墨管	乳粉	37
Cu	—	奶	38,39
Cu	Triton X-100	婴儿食品	40
Cu,Cr,Fe,Pb	—	松针	41
Cu,Zn,Fe,Mn	—	植物纤维	42
Cu	不同 MM	植物	43
Cu	含水标定	饼干、面包	44

测定元素	方法说明	基体	文献
Fe,Cu,Mn,Co,Cr,Mo,Ni	直接测定	奶	45
Fe	含水标定	食品	46
Fe,Ni	超声波自动进样	食用油和脂肪	47
Ge	MIBK-N,N-二甲基甲酰胺萃取涂钼	植物	48
Ge	Ni 作 MM	植物	49,50
Ge	Pd 为 MM	灵芝提取物	51
Ge,Se	—	麦芽	52
Ge	涂钼石墨管	植物及中草药	53
In,Tl	—	植物，食品	54
La	衬钽管	食品	55
Li	EDTA＋KOH 作 MM	烟草	56
Mn,Cu,Ni	—	花粉	57
Sn	$PdCl_2$-$Mg(NO_3)_2$ 为 MM	中药心灵丸	58
Cr,Cd,Pb	$NH_4H_2PO_4$ 为 MM	中药阿胶	59
Mo	全热解管	小麦	60
Mo	萃取和 $HNO_3+H_2SO_4+HClO_4$ 煮解	植物	61,62
Mo	BaF_2 为 MM	婴儿食品	63
Mo	涂 La	米粉	64
Mo	L'VOV 平台	粮食，油料	65
Mo	HNO_3+HClO_4 消解样品	饲料	66
Mo	铜铁灵/$CHCl_3$ 萃取，Ca 作 MM	植物，中草药	67
P	Pd/Cd 为 MM	植物	68
Pb	P,Cd 存在下	鱼罐头	69
Pb,Cd	—	奶酪	70
Pb	L'VOV 平台	植物，食品	71,72
Pb,Cd,Al,Sn	—	啤酒	73
Pb	未经蒸解	奶和婴儿食品	74
Pb,Cd,Mn	萃取	蜂蜜	75
Pb,Cr,Cu	$(NH_4)_2HPO_4$ 为 MM	海藻	76
Pb	$Ni(NO_3)_2$ 为 MM	食品	77
Pb	—	β-胡萝卜素	78
Pb	平台,基体改进	植物油	79
Pb,Cd,Mn,Cu,Cr	—	食品	80
Pb	Pd 为 MM	食品	81
Pb,Cd	悬浮进样	面粉	82
Pb	MIBK 稀释	食用油	83
Pb,Cd	巯基棉富集	食品	84
Pb	STPF,$(NH_4)_2HPO_4$ 为 MM	食品明矾	85
Pb	固体进样	面粉	86
Pb,Cd	固体进样	面粉、米粉	87
Pb	—	蛋白、蛋黄	88

续表

测定元素	方法说明	基体	文献
Pb,Cu	Zr 处理	黑加仑浓缩果汁	89
Pb,Cd	Pd 为 MM	人参	90
Se	涂锆管	粮食	91
Se	乙酸溶解分离,Cu 为 MM	植物	92
Se	悬浮进样	面粉	93
Se	Pd＋抗坏血酸作 MM	食品	94
Se	Ni 涂层	小米	95
Se,Mo	L'VOV 平台	小米，芝麻	96
Se	Cu 作 MM	鸡蛋	97
Se	$Ni(NO_3)_2$ 为 MM	口服液	98
Se	Pd/Mg 为 MM	面粉	99
Sn	Ta,Nb 涂层	脂肪和油	100
Sn	预分离,平台	果汁	101
Sn	钨酸钾作 MM	食用植物油	102
Pt,Pd	灰化后萃取	植物	103
Pb,Cd	$NH_4H_2PO_4$ 作 MM	奶粉	104
多种元素	抗坏血酸为 MM	面粉	105
Zn，Cu，Mo，Pb，Cr，Cd	BaF_2,$NH_4H_2PO_4$,$Mg(NO_3)_2$,$Rh(NO_3)_2$,$Pd(NO_3)_2$ 作 MM 的比较	奶粉	106

① MM 代表基体改进剂。

本表参考文献：

1 Dabeka R W，Lacroix Gladys M A. J Assoc Off Anal Chem，1987；(70)：866
2 Dabeka R W，Lacroix G M A. Can J Spectrosc，1985；(30)：154
3 George G M，Frahm L J，J Assoc Off Anal Chem，1986；(69)：838
4 周彦刚，杨雪峰，陶 锐．光谱学与光谱分析，1989；9(4)：65
5 Cervera M L，Navarro A，Montoro R et al. J Anal At Spectrom，1991；(6)：477
6 李华成等．光谱学与光谱分析，1993；13(6)：61
7 张 萍．光谱实验室，1994；11(3)：65
8 Kukier U，Sumner M E，Miller W P. Commun Soil Sci Plant Anal，1994；(25)：1149
9 Pierson K B，Evenson M A. Anal Chem，1986；(58)：1744
10 杨维秀．冶金分析，1992；12(5)：47
11 Arruda M A Z，Gallego M，Valcarcel M. Anal Chem，1993；(65)：3331
12 Arruda M A Z，Quintela M J，Gallego M et al. Analyst，1994；(119)：1695
13 Schmidt W F，Dietl F. Fresenius'Z Anal Chem，1988；(329)：853
14 Powell L A，Tease R L. Anal Chem，1982；(54)：2154
15 Narres H D，Mohl C，Stoeppler M Z. Lebens-Unters Forsch，1985；(181)：111
16 Hoenig M，Scokart P O，Van Hoeywewghen P. Anal Lett，1984；(17)：1947
17 潘 铎，凌家煜．分析化学，1982；10(3)：190
18 Fleckenstein J. Fresenins'Z Anal Chem，1987；(328)：396
19 Grobecker K H，Kluessendorf B. Fresenius'Z Anal Chem，1985；(322)：673
20 刘武平，李银玉．痕量分析，1989；5(4)：60
21 Lynch S，Littlejohn D. Talanta，1990；(37)：825
22 舒冬妮．光谱仪器与分析，1993；(3)：23
23 Dobrowoiski R，Mierzwa. J. Fresenius'J Anal Chem，1992；(344)：340
24 张进杰等．光谱实验室，1994；11(2)：31
25 朱苓玉等．微量元素与健康研究，1993；10(1)：33
26 Vinas P，Campillo N，Lopez Garcia I et al. Fresenius'J Anal Chem，1994；(349)：306
27 Cabrera C，Lorenzo M L，Lopez M C. J AOAC Int，1995；(78)：1061
28 强 勇，潘景浩．光谱学与光谱分析，1997；17(1)：94
29 毕守法等．光谱学与光谱分析，1985；55(6)：8
30 Alary J，Bourbon P，Vandaele J. Sci Total Environ，1985；(46)：181
31 吴正科，武宗文．分析化学，1988；16(8)：710
32 马玉平，王 冰．岩矿测试，1991；10(增刊)：2
33 马玉平，王 冰．光谱学与光谱分析，1992；12(4)：67
34 陈即惠等．微量元素与健康研究，1993；10(1)：51
35 Xinas P，Campillo N，Garcia I L et al. At Spectrosc，1995；(16)：86
36 Van Schoor O，Claes L，Deelstra H. Beig J Food Chem Bio-technol，1986；(41)：59
37 谈桂权．理化检测（化），1991；27(1)：7
38 Borggward O K，christensen H E M，Ilsoee C. Milchwissenschaft，1984；(39)：725
39 Khammas Z，Marshall J，Littlejohn D et al. Mikrochim Acta，1985；(1)：333
40 Hutchin son D J，Disinski F J，Nardelli C A. J Assoc Off Anal Chem，1986；(69)：60
41 Carrion N，De Benzo Z A，Moreno B et al. J Anal At Spectrom，1988；(3)：479
42 De Benzo Z A，Fernandez M R，Carrion N et al. At Spectrosc，1988；(9)：87
43 马玉平，战国利，陈艳红．分析化学，1992；20(10)：1227
44 Vinas P，Campillo N，Garcia I L et al. J Agric Food Chem，1993；(41)：2024
45 Mingorance M D，Lachica M. Anal Lett，1985；(18)：1519
46 Anzano J M，Paz M-G M，Belarra M A et al. Quim Anal (Barcelona)，1994；(13)：73
47 Van Dalen G，de Galan L. Spectrochim Acta B，1994；(49B)：1689
48 莫晓山，戴 智．理化检验（化），1991；27(6)：348
49 金 珊，徐国华．理化检验（化），1992；28(2)：81
50 汤志勇等．岩矿测试，1992；12(1)：14
51 龙斯华，李益国，贺翠娥．光谱学与光谱分析，1992；12(3)：89
52 舒树芳等．微量元素与健康研究，1993；10(3)：34
53 林琳等．光谱实验室，1994；11(3)：32
54 Evans W H，Brooke P J，Lucas B E. Anal Chim Acta，1983；(148)：203
55 Miaokang S，Yin Yu S. Analyst，1992；(117)：137
56 周立国．理化检验（化），1991；27(1)：45
57 胡晶媛，陈良壁，曾曙．痕量分析，1985；(3/4)：86
58 梁祈，陆嘉文．光谱学与光谱分析，1996；16(5)：88
59 董顺玲．光谱学与光谱分析，1996；16(6)：91

60 王粟等. 光谱学与光谱分析, 1985; 5(2): 67
61 Crutis P R, Grusovin J. Commun Soil Sci Plant Anal, 1985; (16): 1279
62 Lajunen L H J, Kubin A. Talanta, 1986; (33): 265
63 Bermejo-Barrera P, Pita-Calvo C, Cocho de Juan J A. Anal Chim Acta, 1990; (231): 321
64 杨 真. 光谱学与光谱分析, 1992; 12(1): 116
65 高德海等. 微量元素与健康研究, 1993; 10(2): 55
66 王仲华. 光谱实验室, 1993; 10(1): 27
67 高文新等. 分析试验室, 1993; 12(3): 22
68 Curtius A J, Schlemmer G, Welz B J. Anal At Spectrom, 1987; (2): 311
69 Serra T M, Serranop J F V. J Assoc Off Anal Chem, 1984; (67): 186
70 Koops J, Westerbeek D. Neth Milk Dairy J, 1983; (37): 21
71 Koirtyohann S R, Kaiser M L, Hinderberger E J. J Assoc. Off Anal Chem, 1982; (65): 999
72 Rains T C, Rush T A, Butler T A. J Assoc Off Anal Chem, 1982; (65): 994
73 Postel W, Meier B, Markert R. Monatsschr Brauwiss, 1983; (36): 300
74 Andersen J R. Analyst, 1985; (110): 315
75 Stein K, Umland F. Fresenius'Z Anal Chem, 1986; (323): 176
76 Halls D J, Mohl C, Stoeppler M. Analyst, 1987; (112): 185
77 刘玉群, 赵建幸. 分析化学, 1988; 16(1): 94
78 李炳权, 李孟华. 海盐与化工, 1987; 16(4): 8
79 陈树榆, 林淑钦. 光谱实验室, 1987; 4(3): 72
80 邓平建. 分析测定通报, 1987; 6(5): 54
81 Lynch S, Littlejohn D J. Anal At Spectrom, 1989; (4): 157
82 钱 蜀, 杨 真. 分析测试通报, 1990; 9(4): 71
83 苏文周, 徐天源, 卓召模. 分析测试通报, 1988; 7(4): 39
84 马红岩, 吴世平. 分析测试通报, 1988; 7(5): 71
85 苏之周, 徐天源, 卓召模. 分析测试通报, 1988; 7(5): 79
86 彭喜雨, 陶 锐. 光谱学与光谱分析, 1992; 12(3): 97
87 钱 蜀, 杨 真. 理化检验 (化), 1991; 27(1): 25
88 Wang Hong. At Spectrosc, 1991; (12): 87
89 姚德海, 李铁柱. 岩矿测试, 1991; 10(增刊): 21
90 姚金玉, 宋静媛, 周静茹. 光谱学与光谱分析, 1990; 10(1): 27
91 陈良璧, 蔡武华. 分析测试通报, 1985; 4(4): 33
92 Shand C A, Ure A M. J Anal At Spectrom, 1987; (2): 143
93 钱 蜀, 杨 真. 分析化学, 1990; 18(11): 1064.
94 杨 真. 光谱学与光谱分析, 1992; 12(1): 116
95 曾得国. 光谱学与光谱分析, 1991; 11(4): 47
96 龚雪平. 分析化学, 1993; 21(4): 492
97 王 宏. 理化检验 (化), 1993; 27(3): 175
98 林葵等. 光谱学与光谱分析, 1993; 13(6): 85
99 Bendicho C, Sancho A. At Spectrosc, 1993; (14): 187
100 Hocquellet P. At Spectrosc, 1985; (6): 69
101 杜新元等. 分析化学, 1986; 12(4): 90
102 刘红望等. 光谱实验室, 1994; 11(3): 69
103 Kothny E L. Appl Spectrosc, 1987; (41): 700
104 刘红望, 潘振球, 冯家力. 光谱学与光谱分析, 1997; 17(3): 82
105 向立人, 胡耕艳, 刘盛聪. 光谱学与光谱分析, 1989; 9(3): 74
106 Schmiedel G, Mainka E, Ache H J. Fresenius' Z Anal Chem, 1989; (335): 195

表 8-9 石墨炉原子吸收法测定环境物质

测定元素	方法说明	基体	文献	测定元素	方法说明	基体	文献
Mo,Co,Ni	—	土壤	1,2,3	Pb,Cu,Cr,Cd,Ni	—	污泥和残渣	30
As	Pd,Pt 为 MM①	土壤	4	Sn(河)	抗坏血酸为 MM	污泥和残渣	31
Hg	柠檬酸为 MM	土壤	5	As	Pd 为 MM	污泥和残渣	32
Pd,Cd,Ni	磷酸为抑制剂	土壤	6	Cd(河)	平台,$(NH_4)_2SO_4$ 为 MM	污泥和残渣	33
Al	非涂层管	土壤	7	Ag(痕量)	平台	污泥和残渣	34
Au	煮解和萃取	土壤	8	Bi(河)	直接测量	污泥和残渣	35
Be	Zr 涂层	土壤	9	As,Cd,Pd,Se	STPF,MM	污泥和残渣	36
Co	—	土壤	10	Pt,Ir	—	污泥和残渣	37
Mo	—	土壤	11	Pt,Ir	煮解 STPF	污泥和残渣	38
Cd	悬浮进样	土壤	12	Cd(河)	琼脂悬乳进样	污泥和残渣	39
Tl,Cd	悬浮进样	土壤	13	Sr(河)	超声波萃取	污泥和残渣	40
Pb,Cd	—	土壤	14	Al	Pd 为 MM	污泥和残渣	41
Cd,Pb	KI-MIBK 萃取	土壤	15	Cu,Cr,Pb, Ni, Cd,As	超声波进样技术	污泥和残渣	42
Cr	—	土壤	16	Pb	Pd/Mg 为 MM	污泥和残渣	43
Pb	快速程序升温	土壤	17	Tl	Pd+抗坏血酸为 MM	环境样品	44
Cd	固体悬浮进样	土壤	18	As	平台,Pd 为 MM	环境样品	45
Pb,Cd	固体进样,平台,$NH_4H_2PO_4$ 为 MM	土壤	19	Cd	—	环境样品	46
Bi,Tl,V	—	污泥和残渣	20,21,22, 23,24,25	Pb,Cd,Co, Cu, Sn,As,Mo	—	环境样品	47
10 种元素	平台,zeeman	污泥和残渣	26	Ga,In,Tl	—	环境样品	48
Ag(海)	$NH_4H_2PO_4$ 为 MM	污泥和残渣	27	Be	$Mg(NO_3)_2$ 为 MM,Th 处理平台	环境样品	49
Cd,Ni,Cr,Cu,Pb	—	污泥和残渣	28				
In	Pd 为 MM	污泥和残渣	29				

续表

测定元素	方法说明	基体	文献	测定元素	方法说明	基体	文献
Cd	衬钽管,绝对分析	环境样品	50	V,Cd,Ni,Cu,Pb,Fe,Mn	—	烟尘,粉尘	64
Al,B,Ba,Be,Cd,Dy,Ge,P,Se,Sm,Sn	$Ca(NO_3)_2$ 为 MM	环境样品	51	As,Pb,Se,Tl	快速程序升温	烟尘,粉尘	65
As,Cd,Cu,Pb,V	—	环境样品	52	Sn	KOH 作 MM	烟尘,粉尘	66
Sr	金属钨平台	环境样品	53	Ga	Ni 作 MM	烟尘,粉尘	67
Be	预富集	环境样品	54	Sb,Ni,V	Pd/Mg 为 MM	烟尘,粉尘	68
Tl	—	烟尘,粉尘	55,56,57,58	痕量元素	—	烟尘,粉尘	69,70
Cd	$(NH_4)_2HPO_4$,NH_4NO_3 为 MM	烟尘,粉尘	59	Au	平台,MM	阳极泥和渣	71
Pb	zeeman	烟尘,粉尘	60	Ag,Cu,Pb	涂锆平台,抗坏血酸为 MM	电解渣	72
多种元素	STPF	烟尘,粉尘	61	Au	—	水系沉淀物	73
Pb	静电捕获	烟尘,粉尘	62	Ge	CH_4 萃取,涂锆	土壤沉积物	74
Ge	Co 为 MM	烟尘,粉尘	63	Pb	石墨舟	气溶胶	75
				Mo,Ru,Rh,Pd	石墨粉预混	核废料	76

① MM 为基体改进剂。

本表参考文献：

1 Aziz-Airahman A M, Al-Hajjaji M A. Int J Environ Anal Chem, 1983; (15):9
2 Berrow M L, Stein W M. Analyst (London), 1983; (108):277
3 Chen H, Sun H, Z J. Turang (Nanjing), 1985;(17): 36
4 Shanxiavquan et al. Anal Chim Acta, 1983; (1):179
5 倪哲明，杨克原．环境化学，1982; 1(1):84
6 金凤鸣，靖迎春．分析化学，1985;13 (5): 385
7 Ross D S, Bartlett R J, Magdoff F R. At Spectrosc, 1986; (7):158
8 Jain V K, Lall P M, Tiwari J S. At Spectrosc, 1987; (8):77
9 Schmidt W F, Dietl F. Fresenius'Z Anal Chem, 1987; (326):40
10 Mitchell M C, Berrow M L, Shana O A. J Anal At Spectrom, 1987;(2):261
11 Botha P V, Fazakas J, Haries A et al. At Spectrosc, 1987; (8):84
12 徐曼英，赵 多．理化检验（化），1987; 23(4):203
13 袁智能，单孝全，倪哲明．环境化学，1987; 6(3):32
14 金凤鸣，刘凤枝．光谱学与光谱分析，1986; 6(4):45
15 金凤鸣，刘凤枝．农业环境保护，1986; (5):27
16 Ajiec R, Cop M, Stupar J. Analyst (London), 1988; (113):585
17 Hinds M W, Latimer K E, Jackson K W J. Anal At Spectrom, 1991; (6):473
18 邓世林，李新凤．分析化学，1992; 20(8):985
19 邓世林，李新凤，周 平．光谱学与光谱分析，1996; 16(3):106
20 Kempton S, Sterritt R M, Lester J N. Talanta, 1982; (29):675
21 Breder R. Fresenius'Z Anal Chem, 1982; (313):395
22 Caravajal G S, Mahan K I, Goforth D et al. Anal Chem Acta, 1983; (147):133
23 Legret M, Demare D, Marchandise P et al. Anal Chim Acta, 1983; (149):107
24 Sakata M, Shimta O. Bunseki Kagaku, 1982; (31): T81
25 Sturgeon R E, Desaulniers J A H, Berman S S et al. Anal Chim Acta, 1982; (134): 283
26 De Saulniers J A H, Sturgeon R E, Berman S S. At Spectrosc, 1985; (6):125
27 Bloom N. At Spectrosc, 1983; (4):204
28 Corroudo M J T, Reboredo F, Ganho R M B et al. Talanta, 1984; (31):561
29 Shan X Q, Ni Z M, Yuan Z N. Anal Chim Acta, 1985; (171):269
30 Legret M, Diret L, Demare D. Anal chim Acta, 1985; (175):203
31 Jin, L. At Spectrosc, 1984; (5):91
32 Shan XiaoQuan et al. At Spectrosc, 1984; (5):1
33 金龙珠，吴涤尘．环境化学，1983; 2(5):13
34 何铭慈．光谱学与光谱分析，1985; 5(6):13
35 Ni Z, Le X, Han H. Anal Chim Acta, 1986; (186): 147
36 Wel Z B, Schlemmer G, Voelkopf U. Acta Pharmacol Toxicol Suppl, 1986; (59):589
37 Hodge V, Stallard M, Koide M et al. Anal Chem, 1986; (58):616
38 Bettinelli M, Passtorelli N, Baroni U. Anal Chim Acta, 1986; (185):109
39 郭少为，关美玲，王家烈．中国环境监测，1988; 4 (1):19
40 Akcay M, Elik A, Savasci S. Analyst (London), 1989; (114):1079
41 Hoenig M, Regnier P, Chou L. J Anal At Spectrom, 1991; (6):273
42 Van den Akker A H, Van den Heuvel H. At Spectrosc, 1992; (13): 72
43 Bermejo-Barrera P, Baiciel-Alonso C, Aboal-Somoza M et al. Anal At Spectrom, 1994; (9):469
44 单孝全等．光谱学与光谱分析，1981; 5(6):23
45 Dietz M L. At Spectrosc, 1985; (6):59
46 Sperling K R. Fortschr Atomspektrom Spureanal, 1984; (1):385
47 金龙珠，吴涤尘，倪哲明．化学学报，1987; 45(8):808
48 袁智能．应用化学，1986; 3(6):83
49 Vanhoe H, Vandecasteele C, Desmet B et al. Anal At Spectrom, 1988; (3):703
50 Mayizai, BaiJian, Wang Jiazhen et al. J Anal Atom Spectrom, 1992; 7(2):425
51 姚金玉，蒋永清．光谱学与光谱分析，1991; 11(3):45
52 Tittarelli P, Biffi C. In Applications of zeeman Graphite

Furnace Atomic Absorption Spectrometry in the chemical Laboratory and in Toxicology Minoia. C, Caroli, S, Eds; Pergamon; oxford, 1992; pp 79—94
53 孙涤君，王东红．光谱学与光谱分析，1996；16(5)：82
54 Robles L C, Aller A J. J Anal At Spectrom, 1994; (9)：871
55 Bernard H, Pinta M. At Spectrosc, 1982; (3)：8
56 Byrne R E. Anal Chim Acta, 1983; (151)：187
57 Chen G H, Risby T H. Anal Chem, 1983; (55)：943
58 Grognard M, Piolon M. At Spectr, 1985; (6)：142
59 Kumar A, Aggarwal A L, Deshmukh B T. Indian J Pure Appl phys, 1987; (25)：197
60 Vermaak H, Kujirai O, Hanamuraa S et al. Can J Spectrosc, 1986; (31)：95
61 Bettinelli M, Pastorelli N, Baroni U. At Spectrosc, 1986; (7)：45
62 Torsl G, Bergamini G. Ann Chim (Rome), 1989; (79)：45
63 柳志龙．理化检验（化），1990；24(5)：288
64 Fernandez A, Fernandez R, Carrion N, Loreto D, Benzo Z, Fraile R. At Spectrom, 1991; (12)：111
65 Bradshaw D, Slavin W. Spectrochim Acta B, 1989; (44B)：1245
66 林文业等．光谱学与光谱分析，1992；12(4)：71
67 Shan X, Wang W, Wen B. J Anal At Spectrom, 1992; (8)：97
68 Carneiro M C, Campos R C, Curtius A. J Talanta, 1993; (40)：1815
69 张必成．痕量分析，1993；9(1～2)：42
70 张必成．应用化学，1994；11(2)：85
71 经幼苹．冶金分析与测试（分），1985；5(5)：1
72 牟翠萍等．分析测试通报，1986；5(3)：46
73 罗方若．分析化学，1987；15(6)：576
74 李其英，王秋芬．地质实验室，1986；2(2)：95
75 Low P S, Hsu G J. Fresenius'J Anal Chem, 1990; (337)：299
76 Schmiedel G, Mainka E, Ache H J. Fresenius'Z Anal Chem, 1989; (335)：195

表 8-10 石墨炉原子吸收法测定煤、石油化工及半导体材料样品

测定元素	方法说明	基体	文献
Pt	—	煤	1
Hg, As, Se	—	煤	2
Ge	涂锆石墨管	煤	3,4
Se, Te	共沉淀	煤	5
Pb, Zn, Mn	粉末样品	煤	6
Be	平台	煤	7
Se	$Ni(NO_3)_2$ 为 MM[①]	煤	8
Ge	标准添加法标定	煤	9
V	标准添加法标定	煤	10
Pb, Cd, Mn, Cu	L'VOV 平台	NaCl	11
Cu, Cd, Pb, Bi	—	磷酸	12
K, Na	直接进样	超高纯 HCl、HNO_3	13
Pb, Cd	痕量分析	WO_3	14
Fe, Co, Ni, Mo, Cr, Cu	—	高纯 $SiCl_4$	15
Al	Cu-Ni 为 MM	钨酸铵	16
Fe	涂钽热解涂层管	磷化铟	17
Pt	—	卤化铵	18
K, Ca, Na, Mg, Fe, Cr, Mn, Ni	悬浮液进样	高纯 Al_2O_3	19
Si	$CaCO_3$ + $La(NO_3)_2$ 为 MM	α-Al_2O_3	20
Si	铈共沉淀分离	Al_2O_3 助燃剂	21
Cu	—	高纯 KBr	22
Pb	—	高纯 KBr	23
Be	TBP 苯淋树脂分离	U_3O_8	24
Al	—	W, WO_3	25
In	涂锆平台	In-$Hg_{1-x}Cd_xTe$	26
Al	Ni 为 MM	Fe_2O_3	27
Pb	$(NH_4)_3PO_4$ 为 MM	氧化铁颜料	28
Sn	GDX-501 作固定相分离 Sn	$FeCl_3$	29
Fe, Cu, Co, Ni	APDC-MIBK 小体积萃取	高纯 $Ba(NO_3)_2$	30
Fe, Cu, Pb, Bi	—	NaCl、NaBr、NaI	31
Ni, Cr, Cu, Cd, Mn	$(NH_4)Br$ 沉淀分离	$AgNO_3$	32
Mn, Cu, Ni, Fe, Cr	—	$AgNO_3$	33
Co, Ni	APDC 共沉淀分离	高纯氧化镧、氧化钇	34
Co, Cr, Cu, Ni	—	掺杂铌酸锂	35
Fe, Pb, Cu, Ni	—	金属氟化物	36
各种元素	标准添加法标定	Mo_2O_3	37
Al, Cu, Fe, Si	—	碲化镉晶体	38
Al	PMBP-$CHCl_3$ 萃取	高纯氧化镧、氧化钇	39
Si	Mg 作 MM	氮化硼	40
Si	无线电追踪	二氧化锆、二氧化铀	41
As	仲丁基二硫代磷酸铵萃取	MOS 级盐酸	42
Cd, Co	MIBK 萃取	稀土化合物	43
Se	La 作 MM	稀土	44
Eu	NH_4Cl 为 MM	稀土	45
多种元素	—	石油	46
Cd	平台, zeeman	石油	47
V, Ni, K, Na, Cu	—	催化裂化原料油	48
V	热解、涂层石墨管	重质油	49
As	—	页岩油	50,51
Ni	—	汽油	52,53,54
Mn	—	汽油	55
Pb, As	—	汽油	56
Pb	—	润滑油	57
P, B	—	润滑油	58

续表

测定元素	方法说明	基体	文献
Ca,Ba,Zn	—	润滑油添加剂	59,60
Pt	双十二烷基二硫代乙二酰胺萃取	催化剂	61
V	—	催化剂,原油	62
Sb,Ag,Cu	—	催化剂	63
Hg	$Na_2S_2O_3$ 为MM	聚苯乙烯泡塑	64
Pb	—	PVC	65
Mg	含水标定	PVC	66
Cd	—	塑料	67
各种元素	—	石墨粉	68
Cd, Pb, Cu, Fe,Al,Ti	—	硅胶	69
Be	—	氟石粉	70
Ni,Fe,Cu	—	油渣	71
Ca,Cr	—	制革材料	72
Pb	—	化妆品	73
Pd	丁二酮肟-CH_3Cl 萃取分离	感光胶片	74
V	La 作释放剂	燃油中释放剂	75
Pb	zeeman,B C	玻璃	76
Cu, Ni, Cr, Fe	---	超纯玻璃	77
Cu	10%甘油悬浮	玻璃	78
多种元素	—	叠层金属	79
金属	—	酸洗雾化膜	80
Ag, Au, Bi, Cd,Sn,Tl	—	薄层板	81
Fe	HF、HNO_3 消除 Si 的干扰	半导体材料	82
Al, Cr, Cu, Fe	—	硅材料	83
Ge	Ni-Ba 为MM	半导体材料	84
Sb,Pb,Mn	—	硅材料	85
Cu, Co, Cr, Fe,Mn,Ni	Ar 流动混合	硅材料	86

① MM 代表基体改进剂。

本表参考文献：

1 Finkelman R B, Aruscavage P J. Int J Coal Geol, 1981; (1):95
2 Wilkinson J R, Ebdon L, Jackson K W. Anal Proc (London), 1982;(19):305
3 高英奇，倪哲明．化学学报，1982；40(11):1021.
4 Kunc S, Necipoglu Z. Doga Kim Ser, 1987; (11):22
5 Woo I H, Watanabe K. Univ Hiyoshi J. Anal Sci, 1987; (3):49
6 Ali A H, Smith B W, Winefordner J D. Talanta, 1989; (36):893
7 Haraldsen L, Pougnet M A B. Analyst (London), 1989; (114):1331
8 Ebdon L, Parry H G M. J Anal At spectrom, 1988; (3):131
9 Ergenoglu B, olcay A. Fuel Sci Technol Int, 1990; (8): 743
10 Ergenoglu B, olcay A Fuel, 1994; (73):629
11 Khavezov I, Ivanova E. Fresenius'Z Anal Chem, 1983; (315):26
12 Nikolova B, Jordanov N. Talanta, 1982; (29):861
13 王文琴，魏继中．光谱学与光谱分析，1995；15(2):71
14 严慰章，张泰松．分析试验室，1983；2(4):6
15 孙世铭等．分析测试通报，1984；2(2):45
16 何金兰，郑兆佳．岩矿测试，1987；6(3):196
17 周国君．分析化学，1987；15(9):806
18 王喜红，张赣南．贵金属，1986；7(4):54
19 陈天裕，徐臣骞．光谱学与光谱分析，1988；8(3):45
20 唐玉蓉，梁烽．痕量分析，1989；5(3):28
21 胡庆兰，侯婷瑶．理化检验（化），1989；25(6):371
22 沈华奎，徐伯兴，徐道敏．分析试验室，1990；9(5):45
23 沈华奎，徐伯兴，徐道敏．理化检验（化），1990；26(1):38
24 周国君，胡凯光．分析化学，1990；18 (4)：359
25 经幼苹．光谱学与光谱分析，1990；10(2):68
26 杨似燕．理化检验（化），1989；25(2):86
27 Lopez Garcia I, Hernandez Cordoba M. J Anal At spectrom, 1990; (5):647
28 Lopez Garcia I, Hernandez Cordoba M. J Anal At spectrom, 1989; (4):701
29 曾卓．理化检验（化），1992；28(6):367
30 董高翔等．岩矿测试，1991；10(4):287
31 陈天裕，徐臣骞．分析试验室，1991；10(6):38
32 吴学汉，崔光晨，彭云．分析化学，1991；19(11):1352
33 陈雁玲，陈则树．分析测试通报，1991；10(4):46
34 罗淑梅等．分析化学，1991；19(9):1043
35 王喜红．理化检验（化），1991；27(2):108
36 Bayunov P A, Denisov Y P, L'vov B V et al. Zavod Lab, 1990; (56):41
37 Docekal B, Krivan V J. Anal At Spectrom, 1993; (8): 637
38 张霖英等．光谱实验室，1993；10(4):61
39 罗淑梅等．分析化学．1993；21(11):1359
40 Hauptkorn S, Krivan V. spectrochim Acta B, 1994; (49B):221
41 Hauptkorn S, Schneider G, Krivan V. J Anal At spectrom, 1994; (9):463
42 陈优敏，胡昭圣，贾锡平．化学试剂，1986；8(5):310
43 莫胜钧，张卓勇．分析化学，1984；12(5):408
44 何择卫．分析化学，1994；22(1):106
45 何择卫．光谱学与光谱分析，1994；14(2):97
46 Thorburn Burns D, Dadgar D, Harriott M et al. Anlyst, 1984; (109):1613
47 Narres H D, Mohle, Stoeppler M. Int J Environ Anal Chem, 1984; (18):267
48 汪昌仑．光谱学与光谱分析，1991；11(1):68
49 刘梅英．分析仪器，1994；(1):37
50 Fabec J L. Anal Chem, 1982; (54):2170
51 Fish R H, Brinckman F E, Jewett K L. Environ Sci Technol, 1982; (16):174
52 Bruhn F, Cabalin G V. Anal Chim Acta, 1983; (147):

193
53 Lowry J H, Meszaros T J, Conion L. J Autom Chem, 1982; (4):112
54 Scott D R, Holboke L E, Hadeishi T. Anal Chem 1983; (55):2006
55 De la Guardia M, Sanchez M. J At Spectrosc, 1982; (3):36
56 Aneva Z, Iancheva M. Anal Chim Acta, 1985; (167): 371
57 Palmer J M, Rush M W. Analyst (London), 1982; (107):994
58 Holding S T, Rowson J J. Proc Inst pet. London, 1982: 227～231
59 白文林，胡守珍．铁道劳动安全卫生与环保，1987; (1):46
60 王凤英等．光谱学与光谱分析，1989; 9(1):52
61 杨欣荣．分析测试通报，1986; 5(5):59
62 关宏武．理化检验（化），1990;26(4):230
63 杨龙元，李科，辛本仕．理化检验（化），1991;27(2): 92
64 陈静仪等．分析化学，1994; 22(6):573
65 Belarra M A, Lavilla I, Anzano J M et al. J Anal At Spectrom, 1992; (7):1075
66 Belarra M A, Lavilla I, Castillo J R. Anal Sci, 1995; (11):651
67 Pauwels J, Hofmann C, Grobecker K H. Fresenius' J Anal Chem, 1993; (345):475
68 Koshino Y, Narukawa A. Analyst, 1992; (117):967
69 [illegible]
1994; (348):422
70 金楠霞．理化检验（化），1990;26(4):225
71 Sharma S N, Singh I D. Res Ind, 1982; (27):354
72 Kallenberger W E. J Am Leather Chem Assoc, 1983; (78):78
73 吴士定．理化检验（化），1989; 25(4):223
74 吴学汉，崔光晨，彭 云．分析化学，1992; 20(6): 743
75 陈友炜．光谱学与光谱分析，1990; 10(6):68
76 Takada K. Bunseki kagaku, 1989; (38):356
77 Campbell D E, Comperat M. Glastech Ber, 1983; (56):898
78 Morita Y, Tsukada H, Isozaki A. Bunseki kagaku, 1993; (42):551
79 Judelevich I G, Blesel N F, Papina T S et al. spectrochim Acta B, 1984; (39B):467
80 Meneshian M A, Tsao K Y, waggener H A. proc Electrochem Soc, 1985; 85(5):237
81 Kuga K, Ooyu S, Kitazume E et al. Bunseki Kagaku, 1984; (33):E29
82 Stewart D A, Newton D C. Analyst, 1983; (108):1450
83 Phelan V J, Powell R J W. Analyst, 1984; (109):1269
84 Dittrich K, Mandry R, Mothes W et al. Analyst, 1985; (110):169
85 Headridge J B, Johnson D, Jackson K W et al. Anal Chim Acta, 1987; (201):311
86 Bendicho C, De Loos-Vollebregt M T C. Spectrochim Acta B, 1990; (45B):695

30 魏复盛．齐文启编著．原子吸收光谱及其在环境分析中的应用．北京：中国环境科学出版社，1988
31 穆家鹏编译．原子吸收分析方法手册．北京：原子能出版社，1989
32 李玉珍等编著．原子吸收分析应用手册．北京：北京科学技术出版社．1990
33 邓勃等，光谱学与光谱分析，1985；5(6)：17
34 陈丽芳等．分析化学，1984；12(2)：124
35 杨克己等．山东环境，1986；(2)：25
36 刘德源．分析化学，1983；11(6)：440

第九章　原子荧光光谱法

原子荧光光谱法(AFS)是通过测量待测元素的原子蒸气在特定频率辐射能激发下所产生的荧光强度来测定待测元素含量的一种仪器分析方法。

原子荧光光谱法是一种新型的痕量分析技术，也是应用光谱学的一个重要研究和应用领域。与原子吸收、原子发射光谱及分子荧光光谱相比，AFS具有谱线简单，灵敏度高，光谱干扰少等优点，因而特别适用于痕量元素分析及多元素的同时测定。

原子荧光分析技术近年来有了较快的发展，并且已有多种类型的商品原子荧光光谱仪问世，它与原子吸收、原子发射光谱分析技术互相补充，在冶金、地质、环境监测、生物和医学分析等领域得到了日益广泛的应用。

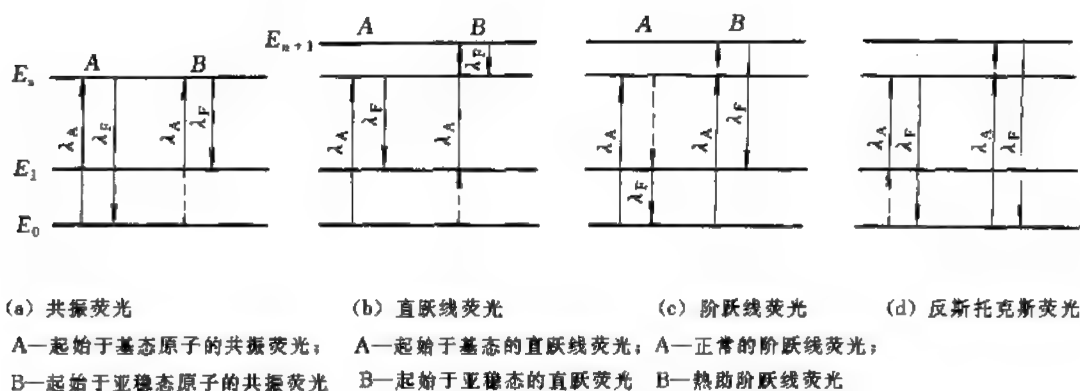
第一节　原子荧光光谱分析基本原理

一、原子荧光的类型

原子吸收电磁辐射由基态跃迁至激发态，然后回到较低能态或基态，发射出一定波长的辐射，这便是原子荧光。原子荧光的类型较多。但用于分析的主要有共振荧光，直跃线荧光，阶跃线荧光，反斯托克斯荧光和敏化荧光等5种，尤以共振荧光的应用最多。

1. 共振荧光

当原子的外层电子吸收波长为 λ_A 的电磁辐射，由基态 E_0（或处于 E_0 邻近的亚稳态 E_1）跃迁至激发态 E_n，然后由 E_n 返回到 E_0（或 E_1）时，则发射出波长为 λ_F 的荧光。由图9-1（a）可见，由于电子由 E_0 跃迁至 E_n 所吸收的能量等于它从 E_n 回到 E_0 时放出的能量，所以 λ_A 等于 λ_F，这一类荧光称为共振荧光。由于相应于原子的激发态和基态之间的共振跃迁的几率一般比其他跃迁几率大得多，因此共振跃迁产生的谱线是对分析最有用的共振荧光，例如荧光谱线 Zn 213.86nm，Ni 232.00nm，Pb 283.31nm 均属共振荧光。



(a) 共振荧光
A—起始于基态原子的共振荧光；
B—起始于亚稳态原子的共振荧光

(b) 直跃线荧光
A—起始于基态的直跃线荧光；
B—起始于亚稳态的直跃荧光

(c) 阶跃线荧光
A—正常的阶跃线荧光；
B—热助阶跃线荧光

(d) 反斯托克斯荧光

斯托克斯荧光

图9-1　原子荧光的类型

λ_A—激发光波长；λ_F—荧光波长

2. 直跃线荧光

由图 9-1 (b) 可见，处于基态 E_0 的电子被激发到 E_n 能级，然后返回到非基态的 E_1 能级，此过程中放出的荧光称为直跃线荧光。在此条件下，激发能大于荧光的能量，因而 λ_F 大于 λ_A，称为斯托克斯过程，例如处于基态的 Pb 原子吸收 283.31nm 线后发射出 405.78 和 722.90nm 线，就是直跃线荧光的典型例子。

3. 阶跃线荧光

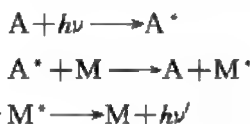
由图 9-1 (c) 可见，处于基态 E_0 的电子被激发到 E_n 能级，然后经过无辐射的去活化跃迁至 E_1 能级，再跃迁至基态而产生荧光，这一类荧光称为阶跃线荧光，此时 λ_F 大于 λ_A，例如，用 Na 330.30nm 线激发 Na 原子，可得到 Na 589.00nm 的阶跃线荧光。

4. 反斯托克斯荧光

当荧光线的波长 λ_F 小于激发线波长 λ_A 时称作反斯托克斯荧光，光子能量的不足部分通常由原子化器提供的热能补充，因而也可称为热助荧光，这类荧光不太常见，如图 9-1 (d) 所示。例如 In 原子吸收热能后，外层电子由基态 E_0 跃迁至 E_1 能级，处于 E_1 能级的电子可吸收 451.13nm 辐射而被进一步激发，当其返回基态时便发射出 410.18nm 的反斯托克斯荧光。

5. 敏化荧光

某元素的原子 (A) 吸收辐射后处于激发态，当其在去活化前通过碰撞将激发能转移给分析元素的原子 (M)，使后者激发，后者通过辐射去活化而发射原子荧光，即为敏化荧光。荧光产生的过程可表示为



$$A+h\nu \longrightarrow A^*$$
$$A^*+M \longrightarrow A+M^*$$
$$M^* \longrightarrow M+h\nu'$$

例如高压 Hg 蒸气与低压 Tl 蒸气混合，用 253.65nm 汞线激发，可观察到 Tl 原子 377.57nm 和 535.05nm 的敏化荧光。

二、原子荧光定量分析基本关系式

原子荧光强度 I_F 与吸收光的强度 I_A 成正比，即

$$I_F=\phi I_A \tag{9-1}$$

式中 ϕ 是荧光过程的量子效率，它表示在单位时间内，荧光辐射的光子数与被吸收的光子数之比。

根据朗伯-比尔定律，可得

$$I_F=\phi I_0(1-e^{-\varepsilon LN}) \tag{9-2}$$

式中，I_0 为激发光源辐射强度；ε 为原子吸收系数；L 为吸收光程长；N 为能吸收辐射线的原子浓度。

将(9-2)式的指数项按泰勒级数展开后得

$$I_F=\phi I_0\left[\varepsilon LN-\frac{(\varepsilon LN)^2}{2!}+\frac{(\varepsilon LN)^3}{3!}\cdots\right] \tag{9-3}$$

因为 N 很低，高次项可忽略，(9-3) 式可简化为

$$I_F=\phi I_0\varepsilon LN \tag{9-4}$$

当实验条件一定时，试液中待测元素的浓度 c 与原子蒸气中基态原子浓度 N 成正比，即

$$N = \alpha c \tag{9-5}$$

将(9-5)式代入(9-4)式得

$$I_F = \phi I_0 \varepsilon L \alpha c \tag{9-6}$$

实验条件一定时，ϕ，I_0，ε，L 和 α 均可视为常数，则原子荧光强度与试液中待测元素的浓度成正比，(9-6)式即为原子荧光光谱法定量分析的基本关系式。由此式可知：

①荧光强度随激发光源强度的增加而增高，因而用强光源可提高灵敏度，降低检出限。

②延长吸收光程，可提高灵敏度。

③ (9-6) 式只有在待测元素浓度较低时才成立，高浓度时 I_F 与 c 的关系为非线性，所以原子荧光光谱法特别适用于痕量元素测定。

④量子效率 ϕ 随火焰温度和火焰组成而变化，因此必须严格控制这些因素。

三、原子荧光的猝灭

处于激发态的原子寿命是十分短暂的，当它从高能级跃迁到低能级时将发射出荧光，也可能在原子化器中与其他分子、原子或电子发生非弹性碰撞而丧失其能量，在后一种情况下，荧光将减弱或完全不产生，这种现象称为荧光的猝灭，为了衡量原子在吸收光能后究竟有多少转变为荧光，提出了所谓的荧光量子效率 (ϕ)，其定义为

$$\phi = \phi_F / \phi_A \tag{9-7}$$

式中，ϕ_F 为单位时间发射的荧光光子数；ϕ_A 为单位时间吸收激发光的光子数。在一般情况下荧光量子效率小于 1，表 9-1 列出了几种常见元素在不同火焰中的量子效率。

表 9-1　几种常见元素在不同火焰及氩气中的荧光量子效率

火焰成分	温度/K	荧光量子效率				
		Na	K	Li	Tl	Pb
$2H_2/O_2/4N_2$	2100	0.066	0.047	0.021	0.070	0.079
$6H_2/O_2/4N_2$	1800	0.049	0.049	0.014	0.099	0.10
$0.4C_2H_2/O_2/4N_2$	2200	0.042	0.028	0.017	0.042	0.067
$2H_2/O_2/Ar$	1800	0.75	0.37	0.15	0.33	0.22
$H_2/O_2/4N_2$	1600	0.044	0.03	—	0.051	0.069
热氩气	3000	≥0.98	≥0.99	≥0.95	≥0.99	≥1

荧光猝灭有下述几种类型：

(1) 与自由原子碰撞



M^* 为激发原子，M 和 X 为中性原子。

(2) 与分子碰撞



这是形成荧光猝灭的主要原因，AB 可能是火焰的燃烧产物。

(3) 与电子碰撞



(4) 与自由原子碰撞后，形成不同的激发态



M^* 和 $M^{\times}$ 为原子 M 的不同激发态。

(5) 与分子碰撞后，形成不同的激发态



(6) 化学猝灭反应



A 和 B 为火焰中存在的分子或稳定的游离基。

上述荧光猝灭过程将导致荧光量子效率降低，荧光强度减弱，因而严重影响原子荧光分析。为了减小猝灭的影响，应当尽量降低原子化器中猝灭粒子的浓度，特别是猝灭截面大的粒子浓度。另外，还要注意减少原子蒸气中二氧化碳、氮和氧等气体的浓度。

第二节　原子荧光光谱分析的主要仪器设备

一、原子荧光光谱仪的基本组成部分

原子荧光光谱仪由激发光源，原子化器，分光系统及检测系统四部分组成。

(一) 激发光源

光源的作用是使待测元素的原子激发而发射荧光，对激发光源的要求是：强度大，无自吸；稳定性好，噪声小，辐射光谱重现性好；适宜多元素同时分析，操作简便，价格低廉，使用寿命长等。激发光源可以是锐线光源或连续光源。目前应用较多的光源有：空心阴极灯，无极放电灯，金属蒸气放电灯，汞放电灯，微波诱导等离子焰，电感耦合等离子焰，可调谐染料激发器，二极管激光和大功率氙弧灯等。

1. 空心阴极灯

空心阴极灯包括普通空心阴极灯，高强度空心阴极灯，水冷式空心阴极灯，可拆式空心阴极灯和脉冲空心阴极灯等，与原子吸收分析用的空心阴极灯基本相同。普通式空心阴极灯由于发光强度较弱，不适宜原子荧光分析，可拆式和水冷式空心阴极灯的应用也很有限。高强度空心阴极灯，由于有较高的输出强度和较好的稳定性，而成为原子荧光分析的一种常用激发光源。近年来人们使用较多的还有脉冲空心阴极灯。脉冲空心阴极灯是以几十毫安，几百毫安，甚至几安的峰电流给空心阴极灯以脉冲供电，从而使谱线强度大为提高。

2. 无极放电灯

无极放电灯是原子荧光分析中的一种重要激发光源，特别适用于共振线波长很短的易挥发元素的分析。

微波激励的无极放电灯是在内径 (3～12) mm，长 (30～40) mm 的石英管中放人数毫克待测元素或其化合物，充入低压气体 Ar 或 Ne，压力为 (133.322～266.644) Pa，构成没有电极的放电管，将其置于与微波发生器匹配的空腔谐振器内，依靠微波电磁场供给能量。无极放电灯也可用射频激励[475]，用射频源代替微波源有利于提高灯的稳定性，延长使用寿命。影响无极放电灯性能的主要因素是灯管的直径和容积，填充气体的性质和压力，装入灯管中材料的性质和质量。与高强度空心阴极灯相比，无极放电灯的辐射强度更高，自吸收小，谱线窄，制作容易，使用方便，成本低，寿命长，它已被原子荧光分析广泛采用。目前已经制成几十种元素的无极放电灯，并可制作两元素或多元素灯。

3. 可调谐染料激光器

可调谐染料激光器是原子荧光分析的理想光源，目前国外对这方面的研究工作十分活跃，某些元素的检出限可达 fg (femto gram) 数量级[476]。与其他激发光源相比，可调谐染料激光器具有很好的脉冲特性和很高的发射强度，其输出功率比其他光源要高几个数量级。用这样

强的光源进行分析时，可以获得极低的检出限，激光器的使用已使 AFS 成为一种重要的痕量元素分析法。

一般的固体或气体激光器只发射少数几条谱线，用于激发原子荧光有很大的局限性。可调谐染料激光器通过适当选择染料和光栅角度，可用于（360～650）nm 范围内的任何波长，采用倍频技术可使激光扩展到 200nm，但光能损失较大。

4. 等离子体光源

将含有某一元素的溶液（浓度为 1%～10%）喷入电感耦合等离子体中，则得到该元素的发射光谱，它可作为激发原子荧光的光源。这种方法的优点在于操作者可以很方便地更换喷入电感耦合等离子体的元素溶液，从而可以由原子化器中获得多种元素的荧光信号。电感耦合等离子体光源的辐射中有丰富的原子线和离子线可供选用，可用于多元素的同时测定[477]。目前这方面的研究文章日渐增多。

5. 连续光源

在原子荧光分析中，连续光源若有足够的强度也是很适用的，因为连续光谱包含的频谱范围宽，分析线分布在此范围内的元素都能被激发，因而特别适用于多元素的同时测定。在连续光源中，应用较多的是大功率高压氙弧灯，功率可达 500W，其检出限要比锐线光源差，散射干扰及光谱干扰都较严重。近年来，不少工作者采用牌号为 Eimac 的短弧高压氙灯，这是一种改良过的高压氙弧灯，具有镀铝反射镜，亮度比过去有较大提高，再配以中阶梯光栅单色器可改善检出限并减少光谱干扰。

从目前情况来看，现有的光源各有其特点，但还没有一种光源能满足原子荧光分析的全部要求。表 9-2 将原子荧光分析的几种常用光源的性能作了比较，通过比较可以看出，激光光源性能最优，但昂贵的价格限制了它的广泛使用；无极放电灯性能较好，价格不高，宜于广泛使用，一般用作单元素分析；连续光源或等离子体光源适用于多元素的同时测定，但检出限较差。

表 9-2　常用激发光源的原子荧光分析性能比较

比较项	激光器	无极放电灯	高强度空心阴极灯	连续光源
发光强度	发光强度最强，发射的谱线窄，单色性好	发光强度次之，比高强度空心阴极灯稍强，背景小，谱线窄	高强度和脉冲空心阴极灯发光强度不够，一般空心阴极灯强度太小	发光强度较低，能进行多元素分析
检出限	较好	较好	较低	较低
干扰情况	干扰最小	有干扰	有干扰	干扰较多
线性范围	5 个数量级	4 个数量级	2～3 个数量级	2～3 个数量级
稳定性	其稳定性视装置形式而定	稳定性较好，一般≤1%～0.5%	稳定性较好，一般为 0.5%	稳定性好
价格	染料激光器需要调频和倍频，价格昂贵	低廉	较贵	便宜

（二）原子化器

原子化器是提供待测元素自由原子蒸气的装置，原子荧光分析对原子化器的要求是：高原子化效率，低猝灭性，背景辐射弱，稳定性好，操作简便等，常用的原子化器有下述几种：

1. 火焰原子化器

火焰原子化器的结构和工作原理与原子吸收分析用的原子化器相似，不同之处是前者采用方型或圆型截面火焰，以提高荧光辐射的强度和稳定性。

火焰原子化器具有结构简单，操作方便，价格低廉，稳定性好等特点，广泛用于原子荧光分析。金属原子在火焰中发射的荧光强度取决于所用火焰的类型，不同类型的火焰，具有不同的温度和组成。火焰中的许多分子，如CO_2、CO、N_2和H_2O等都是荧光猝灭剂，应采用猝灭剂浓度低的氢火焰，并以氩气-氧气代替空气，以便提高原子荧光效率。

2. 无火焰原子化器

无火焰原子化器包括石墨炉原子化器及其他炉原子化器。这类原子化器在达到高温的瞬间，原子化器中原子浓度很高，但背景和热辐射很弱，猝灭效应也小，因而可获得很好的检出限。若以可调谐染料激光器为激发光源，采用石墨炉原子化技术，检出限一般可达 pg 数量级。

3. 氢化物法原子化器

最近几年来，氢化物发生-原子荧光光谱法得到了较快发展[478]，这种方法是基于在含 As、Sb、Bi、Se、Te 和 Sn 的酸性溶液中加入硼氢化钠，使上述各元素形成氢化物，当氢化物引入氩氢焰被原子化时可以得到很高的灵敏度。为此而设计了一种专门用于氢化物法的原子化器，其主要部分是用电阻丝加热的石英管和氢化物发生器。在氢化物发生器中硼氢化钠与酸反应生成氢气被氩气带入石英管时，氢气被点燃并形成氩氢焰。与此同时，在发生器中待测元素被还原生成氢化物。生成的氢化物被氩气带入石英管，在管口的氩氢焰的高温条件下分解成原子。这种原子化器不需要氢气钢瓶，经济实用，将其用于原子荧光分析时，可在氩氢焰的周围加有屏蔽气以进一步改善检出限及稳定性，该技术已获得国家发明专利[479]。

4. 电弧脉冲加热原子化器和阴极溅射法

采用电弧脉冲加热原子化器时，样品放在杯形石墨电极的小孔中，然后用脉冲电流加热。在阴极溅射法中，一个可更换的阳极（即样品）放在装有石英窗的放电室中，用氩作充填气体，工作电流为 35mA，溅射的原子蒸气以高强度灯激发。上述方法适宜固体样品原子化，曾用于铁基合金中某些元素的测定。

5. 电感耦合高频等离子体（ICP）原子化器

ICP 放电可获得高温，稳定性好，其高温可使一些难熔物质气化解离为原子或离子，基体效应小，因此 ICP 不仅是一种优良的激发光源，也是一种优良的原子化器或离子化器。ICP 作为原子荧光分析的原子化器可用于多种元素分析，尤其对难熔元素的分析更为有利，若以脉冲空心阴极灯为激发光源，则检出限可低达 $ng \cdot ml^{-1}$。

（三）分光系统

原子荧光光谱简单，谱线干扰小，对单色器的分辨率要求不高，光栅和棱镜是常用的分光器，有时也用滤光片分光，在特殊情况下，甚至不用任何分光器也能进行原子荧光分析。

（四）检测系统

在原子荧光光谱仪中，目前普遍使用的检测器仍以光电倍增管为主。对于无色散系统来说，为了消除日光的影响，必须采用光谱响应范围为（160～320）nm 的日盲光电倍增管。此外，也有人用光电摄像管和光电二极管阵列作检测器。

二、原子荧光光谱仪简介

在 80 年代前，几乎没有成功的商品原子荧光仪问世，80 年代以后，商品原子荧光仪器才开始得到发展。按照有无色散系统可将原子荧光光谱仪分为两类：无色散原子荧光光谱仪和有色散原子荧光光谱仪。

1. 无色散原子荧光光谱仪

无色散原子荧光光谱仪由激发光源，原子化器，日盲光电倍增管、放大检测系统，以及滤光系统和聚光系统组成，它是通过滤光器和日盲光电倍增管的联合使用获得单色器效果。这类仪器的特点是：结构简单，操作方便，价格低廉，照明立体角大，光谱通带宽，荧光信号强，检出限低，但干扰大，散射光的影响也较大。

美国 Technicon 公司生产的 AFS-6 原子荧光光谱仪是无色散型仪器。它的激发光源由 6 个脉冲空心阴极灯组成，使用火焰原子化器，滤光器由 6 个固定波长的滤光片组成并安装在转轮上。当滤光片 1 旋转到光路上时，空心阴极灯 1 和积分器 1 处于工作状态，对一种元素进行检测。当滤光片 2 旋转到光路上时，空心阴极灯 2 和积分器 2 处于工作状态，对另一种元素进行检测，依此类推，可按程序逐一进行多个元素的分析。

美国 Baird 公司制造的 AFS-2000 等离子体原子荧光光谱仪是无色散型 12 道原子荧光分析仪。它采用脉冲空心阴极灯为激发光源，电感耦合等离子体为原子化器，该仪器共有 12 个通道，每个元素有各自的通道，每个通道由空心阴极灯，滤光片和光电倍增管组成，一次可测定 12 个元素。该仪器具有多元素同时测定，灵敏度高，基体干扰小，动态范围大等特点。

共振探测系统的原子荧光光谱仪是另一种工作原理的无色散多元素分析仪，仪器中的共振探测系统只能检测待测元素的共振荧光，有单色器的作用，原子化器中存在的其他光辐射及原子化器本身产生的光辐射都不会被检测。该仪器可同时对多个元素进行检测，特别适于高含量易挥发元素的分析。

2. 有色散原子荧光光谱仪

在有色散原子荧光光谱仪中，目前多采用双光栅甚至三光栅分光系统。这类仪器容易进行谱线选择，可利用的波长范围宽，光谱干扰小，杂散光少，有较好的信噪比，特别适于多元素同时测定，不足之处是成本高，操作比较繁琐。

程序控制扫描式原子荧光光谱仪是色散型仪器，它包括激发光源（连续光源或激光光源），原子化器，程序控制的色散系统，固定狭缝，探测器，放大系统和读出系统，探测器置于色散系统的固定狭缝处（焦面），通过程序控制装置，步进马达转动色散元件，将色散后的荧光顺序地引出固定狭缝并进行检测。

研制性能优良的仪器是发展原子荧光分析技术的关键，我国科技工作者亦开展了这方面的研究。北京地质仪器厂同西北有色地质所合作，于 1987 年推出了 XDY-2 系列双道原子荧光光谱仪，该仪器采用特制的高强度空心阴极灯，屏蔽式石英原子化炉，微机进行仪器控制和数据采集，大大提高了分析的稳定性和可靠性。近年来，北京地质仪器厂又不断对此仪器作了较大的技术改进，相继推出了 XDY-2A 等仪器。1995 年，北京海光仪器公司推出了 AFS 系列产品，如 AFS-120，AFS-220，AFS-230 等双道原子荧光光度计。经过不断的开发研制，AFS 系列仪器的整机分析性能得到了大幅度提高。地质矿产部物化探测研究所推出了 XGY-1011A 型原子荧光光谱仪，该仪器获四项国家专利，其性能特点，技术指标令人满意。

第三节　元素的原子荧光测定

本节表中所用缩略语如下：

原子化器

Ac	乙炔	MIP	微波诱导等离子体
CGF	连续石墨炉	MNP	亚稳氮等离子体
DCP	直流等离子体	NG	天然气
ETA	电热原子化器	PCGD	平面阴极辉光放电
GDSC	辉光放电溅射池	Prop	丙烷
GF	石墨炉	RF	射频等离子体
Hy	氢化物发生	S	分离焰
ICP	电感耦合等离子体	VC	蒸发室
LAP	激光烧蚀等离子体	W-S	钨螺丝原子化器

火焰按如下方式标明：保护气/氧化剂/燃料

激发光源

BHCL	高强度空心阴极灯	ICP	电感耦合等离子体
CWDL	连续染料激光器	LE	激光激发
DHCL	可拆卸空心阴极灯	LPDL	激光泵浦染料激光器
EDL	无极放电灯	MIP	微波诱导等离子体
EW	爆破线	MVL	金属蒸汽灯
FLDL	泵激励染料激光器	PDL	脉冲染料激光器
HCL	空心阴极灯	PHCL	脉冲空心阴极灯
HFDL	高频放电灯	PXe	脉冲氙弧灯
HgDL	汞放电灯	Xe	氙弧灯
HIHCL	高强度空心阴极灯	XeFL	氙闪光灯

激发跃迁

NS　未详细列举说明

荧光跃迁

ND	非色散	SB	日盲光电倍增管
NS	未详细列举说明		

本节给出了各种元素的原子荧光光谱数据及原子荧光测定参数和检出限。有关原子荧光光谱数据的表引自本书第一版[480]，有关原子荧光测定参数和检出限表主要引自B、W、Smith等，《原子荧光检出限和实验条件综合表》一文[481]。

表 9-3　银的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃　迁	光源相对发射强度①	相对荧光强度①	
				空气-乙炔	Ar-O-H
328.07	0～3.778	$2S_{1/2}\sim 2P^0_{3/2}$	100	100	100
338.29	0～3.604	$2S_{1/2}\sim 2P^0_{1/2}$	59	56	79

① BOHCL(S-W)光源。

表 9-4　银的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
328.1	338.3	GF	PDL	0.003(0.1)pg	226		328.1	CGF	Xe 150	0.7	117
328	338	GF	PDL	0.002(0.02)pg	228	328.0	328.0	ICP	HCL	2	43
338.3	338.3	Air/Ac	HCL	20	248	328.1	328.1	S/Air/Ac	ICP	8	4[illegible]

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]
328.1	328.1	S/Air/Ac	EDL	0.8	44		338.3	Air/Ac	Xe 500	4000	171
NS	NS	ICP	HCL	0.2	4		328.1	Ar/Air/H_2	Xe 150	100	223
	328.1	He/O_2/Ac	Xe 300	200	148	328.1	328.1	Air/H_2	HIHCL	1	12
	328.07	N_2O/Ac	Xe 300	70	153		328.2	Air/H_2	Xe 150	200	258
	328.07	Air/Ac	Xe 300	300	153		328.2	N-S/Air/Ac	Xe 300	50	180
NS	NS	GDSC	BHCL	1000	119		328.1	GF+MNP	Xe 300	6ng	14
	328.1	He/O_2/Ac	Xe 300	200	156		328.1	Ar-S/Air-Ac	XeFL	20	16
	328.1	Air/Ac	Xe 300	10000	156		328.1	Ar-S/Air-Ac	Xe 150	4	16
328.1	328.1	ICP	HCL	1	158	NS	NS	ICP	HCL	<0.1	17
NS	328.1	ICP	HCL	30	5	338.3	338.3	ICP	HCL	30	20
328.068	328.068	N_2-S/Air/H_2	EDL	100	7	328.07	338.29	ICP	PDL	1.3	276
	338.289	Air/Prop	Xe 150	200	163		328.07	Ar-S/Air-Ac	Xe 300	4	185
	338.289	Air/H_2	Xe 150	100	163		328.07	N-S/Air/Ac	Xe 300	7	27
	328.068	O_2/H_2	Xe 450	3	330	328.1	328.1	Air/Ac	PDL	4	29
	328.068	S/Air/H_2	Xe 450	1	330		328.1	Ar-S/Air-Ac	PXe 300	3	187
328.068	328.068	Ar/Air/H_2	EDL	0.5	291		328.1	Ar-S/Air-Ac	Xe 500	1	28
	328.068	Ar/O_2/H_2	Xe 900	500	291		328.1	GF	Xe 150	0.6(0.3pg)	186
328.068	328.068	Air/Ac	HIHCL	4	430	328.1	328.1	CGF	EDL	0.4	54
328.068	328.068	Air/Ac	HCL	80	49	328.1	328.1	Air/H_2	EDL	0.8	55
328.068	328.068	S/Air/Ac	HCL	20	49		328.1	Air/Ac	Xe 900	30	30
	328.068	Air/H_2	Xe 150	50	50	328.1	328.1	GF	EDL	0.8(0.4pg)	188
328.068	328.068	Air/H_2	EDL	0.1	51	NS	NS	GF	HIHCL	0.0005	83
338.289	338.289	O_2/H_2	PHCL	200	165	NS	NS	GF	LE	—	431
328.1	328.1	W loop	EDL	0.8(2pg)	112	NS	NS	GF	LE	—	277
	328.1	Air/Ac	Xe 500	3000	171	NS	NS	—	ETALE	0.02pg	239

① 文献集中列于本章末。

表 9-5 铝的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度	相对荧光强度
236.71	0~5.235	$^2P^0_{1/2}$—$5d^2D_{3/2}$	2	0.03
237.31 237.34	0.014~5.235	$^2P^0_{3/2}$—$5d^2D_{5/2}$ $^2P^0_{3/2}$—$5d^2D_{3/2}$	4	0.05
256.80	0~4.827	$^2P^0_{1/2}$—$4d^2D_{3/2}$	3	0.05
257.51 257.54	0.014~4.827	$^2P^0_{3/2}$—$4d^2D_{5/2}$ $^2P_{3/2}$—$4d^2D_{3/2}$	6	0.05
308.22		$^2P^0_{1/2}$—$3d^2D_{3/2}$	56	12
309.27 309.28	0.014~4.020	$^2P^0_{3/2}$—$3d^2D_{5/2}$ $^2P^0_{3/2}$—$3d^2D_{3/2}$	100	24
394.40	0~3.143	$^2P^0_{1/2}$—$^2S_{1/2}$	52	50
396.15	0.014~3.143	$^2P^0_{3/2}$—$^2S_{1/2}$	78	100

表 9-6 铝的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]
396.2	396.2	MIP	HCL	40	1	308.215	308.215	S/N_2O/Ac	HIHCL	5500	9
308.2	308.2 309.3	GF	PDL	0.4(4pg)	2	394.401	396.153	N_2O/Ac	PDL	5	10
						396.153	396.153	N_2O/Ac	PDL	30	10
309.2	309.2	ICP	HCL	20ng	3	394.401	394.401	N_2O/Ac	PDL	100	10
NS	NS	ICP	HCL	5	4	396.1	396.1	N_2O/Ac	PDL	30	11
NS	394.4 396.2	ICP	HCL	100	5	387.0	387.0	Air/H_2	HIHCL	25000	12
						396.2	396.2	ICP	HCL	20	13
394.403	396.153	ICP	PDL	0.4	6		394.4	GF+MNP	Xe 300	3.5mg	14
396.153	396.153	N_2O/H_2	EDL	2000	7	396.2	396.2	ICP	ICP	45	15
396.153	396.153	N_2O/Ac	EDL	200	8		309.2	Ar-S/N_2O/Ac	XeFL	7000	16
394.401	394.401	S/N_2O/Ac	EDL	120	8		309.2	Ar-S/N_2O/Ac	Xe 150	200	16
396.153	396.153	S/N_2O/Ac	HIHCL	1500	9	NS	NS	ICP	HCL	5	17
394.401	394.401	S/N_2O/Ac	HIHCL	2500	9	394.4	396.2	GF	PDL	0.1ng	18
309.271	309.284	S/N_2O/Ac	HIHCL	3500	9	394.4	394.4	ICP	HCL	100	19

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
396.2	396.2	ICP	HCL	1000	20	309.3	309.3	Ar-S/N_2O/Ac	Xe 500	200	28
394.4	396.2	GF	PDL	100(0.5ng)	21	394.4	396.1	N_2O/Ac	PDL	0.6	29
394.4	394.4	ICP	ICP	10	22	396.2	396.2	N_2O/Ac	Xe 900	800	30
309.28	309.28	ICP	ICP	8000	23		394.4	ICP	ICP	45	31
NS	NS	ICP	ICP	20	24		394.4	ICP	ICP	37	32
	394.4	GF+Air/Ac	Xe 300	1000	25	257.5	308.2	GF−Ar/Ac	PDL	0.1pg	33
308.2	308.2	N-S/N_2O/Ac	ICP	1000	26	257.5	309.3	GF+Ar/Ac	PDL	0.1pg	33
309.27	309.27	N-S/N_2O/Ac	Xe 300	700	27						

① 文献集中列于本章末。

表 9-7 砷的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对荧光强度		
			空气-乙炔	N-H	Ar-H
189.04	0～6.557	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{5/2}$	26	32	33
193.76	0～6.398	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{3/2}$	40	34	46
197.26	0～6.285	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{1/2}$	40	37	53
228.81	1.353～6.770	$^2D^0_{5/2}$—$^2P_{3/2}$	58	3	5
234.98	1.313～6.588	$^2D^0_{3/2}$—$^2P_{1/2}$	168	116	208
238.12	1.353～6.557	$^2D^0_{5/2}$—$^4P_{5/2}$	33	52	56
243.72	1.313～6.398	$^2D^0_{3/2}$—$^4P_{3/2}$	9	12	17
245.65	1.353～6.398	$^2D^0_{5/2}$—$^4P_{3/2}$	45	48	67
249.29	1.313～6.285	$^2D^0_{3/2}$—$^4P_{1/2}$	44	56	80
274.50	2.255～6.770	$^2P^0_{1/2}$—$^2P_{3/2}$	—	<0.5	约 0.5
278.02	2.312～6.770	$^2P^0_{3/2}$—$^2P_{3/2}$	—	0.5	1.0
286.04	2.255～6.588	$^2P^0_{1/2}$—$^2P_{1/2}$	—	34	63
289.87	2.312～6.588	$^2P^0_{3/2}$—$^2P_{1/2}$	—	5	85
303.28	2.312～6.398	$^2P^0_{3/2}$—$^4P_{3/2}$	—	11	15
311.96	2.312～6.285	$^2P^0_{3/2}$—$^4P^1_{1/2}$	—	—	—

表 9-8 砷的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
193.7	193.7	ICP	PDL	10	34	234.984	234.984	Ar/Ac	EDL	2000	78
NS	NS	Air/Ac	EDL	800	69	193.696	193.696	Air/H_2	HCL	1000	49
235.1	235.1	Air/Ac	EDL	25000	35	189.0	189.0	Air/H_2	EDL	200	79
193.7	193.7	Ar/Air/H_2	EDL	2ng	70	NS	ND	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.04	80
193.7	193.7	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.1(0.1ng)	37	193.6	193.6	N-S/Air/Ac	DCP	22000	81
193.7	193.7	Ar/Air/H_2	EDL	0.05ng	38	193.7	193.7	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	25	82
193.7	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.12(2.3ng)	71		193.7	N-S/Air/Ac	Xe	1300	52
193.7	ND	N_2/Air/H_2	EDL	0.24(4.8ng)	71	193.7	193.7	N-S/Air/Ac	EDL	1300	52
	189.0	Ar/Air/H_2	Xe 300	0.5ng	72	235.0	235.0	N-S/Air/Ac	ICP	5000	26
	193.7	Ar/Air/H_2	Xe 300	0.67ng	72		193.7	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	300000	53
	197.2	Ar/Air/H_2	Xe 300	1.1ng	72	193.7	193.7	Ar-S/Air/Ac	EDL	15000	53
	235.0	Ar/Air/H_2	Xe 300	2.6ng	72	NS	NS	GF	HHCL	0.5	83
	ND	N_2-S/Air/Ac	BHCL	100	40	NS	NS	HG	HCL ICP	30ng	56
	ND	N_2-S/Air/Ac	EDL	400	40	NS	ND	HG	EDL	270	84
189	193	ICP	HCL	200	43	NS	ND	HG	EDL	110	85
	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.01ng	73	NS	NS	HG	EDL	—	86
	ND	HyVC	EDL	0.2ng	45	NS	NS	HG	EDL	50	87
	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.34	74	NS	ND	HG	EDL	1.2ng	57
	ND SB	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	8pg	75	NS	ND	HG	EDL	0.58ng	88
193.7	193.7	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	30ng	76	NS	ND	HG	EDL	—	89
193.7	193.7	Ar/Air/H_2	EDL	0.01ng	77	NS	ND	HG	—	—	90
234.984	234.984	Ar/Air/H_2	EDL	250	78	NS	NS	HG	EDL	1ng	61
234.984	234.984	N_2/Air/H_2	EDL	500	78	NS	ND	FI-HG	HCL	1.0ng	62
228.812	228.812	N_2/Air/H_2	EDL	500	78	NS	NS	HG	EDL	—	91

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]
NS	NS	Hy	BHCL	—	92	193.7	NS	HG + Ar/Air/H_2	HCL	As(Ⅲ)35ng As(Ⅴ)50ng	95
NS	NS	Hy	BHCL	50pg	93						
193.7	245.7	GF	FLDL	0.0054	94	193.7	245.6	Ar-ICP	LE	20	96
NS	NS	HG	EDL	0.79	64	NS	NS	Hy	EDL	100	68

① 文献集中列于本章末。

表 9-9　金的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃　迁	相对光源发射强度[①]	相对荧光强度[②]
242.80	0～5.105	$^2S_{1/2}$—$^2P^0_{3/2}$	100	100
267.60	0～4.632	$^2S_{1/2}$—$^2P^0_{1/2}$	96	52
302.92	1.136～5.227	$^2D_{5/2}$—$^4P^0_{5/2}$	42	1
312.28	1.136～5.105	$^2D_{5/2}$—$^2P^0_{3/2}$	12	5

① 高强度空心阴极灯激发。

② 在 Ar-O-H 火焰。

表 9-10　金的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]
242.8	242.8	Air/Ac	EDL	21	141	242.795	242.795	Air/Ac	HCL	4000	48
267.6	267.6	Air/Ac	EDL	25	141	242.795	242.795	Air/Ac	HIHCL	150	48
242	242	Air/H_2	HCL	300	143	242.795	242.795	S/Air/Ac	HCL	1000	48
267	267	Air/H_2	HCL	200	143	242.795	242.795	S/Air/Ac	HIHCL	50	48
267.6	267.6	ICP	HCL	10	43	242.795	242.795	S/Air/Ac	HCL	7000	49
NS	NS	ICP	HCL	2	4	242.795	242.795	Air/Ac	HCL	14000	49
242.8	242.8	ICP	HCL	20	158	267.595	267.595	O_2/H_2	EDL	200	51
267.595	267.595	Ar/H_2	DHCL	50	273	267.595	267.595	O_2/H_2	PHCL	200	165
267.595	267.595	O_2/H_2	EDL	200	232	267.7	267.6	Air/H_2	HIHCL	50	12
—	267.595	Ar/Air/H_2	Xe150	4000	162	NS	ND SB	N-S/Air/Ac	HIHCL	0.5	275
242.795	242.795	Ar-S/O_2/H_2	HIHCL	5	274	NS	NS	ICP	HCL	0.3	17
267.595	267.595	Ar-S/O_2/H_2	HIHCL	20	274	267.60	267.60	ICP	PDL	11	276
312.282	312.282	Ar-S/O_2/H_2	HIHCL	2500	274		242.79	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	300	185
242.795	242.795	Air/H_2	HIHCL	15	274		267.59	N-S/Air/Ac	Xe 300	100	27
267.595	267.595	Air/H_2	HIHCL	70	274		267.5	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	200	187
242.795	242.795	Air/Ac	HIHCL	15	274		267.5	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	150	28
267.595	267.595	Air/Ac	HIHCL	70	274	NS	NS	GF	HIHCL	0.01	83
267.595	267.595	Ar-S/O_2/H_2	HCL	3	255	242.797	312.28	GF	XeCL	—	277
267.595	267.595	Ar-S/O_2/H_2	HIHCL	50	255						

① 文献集中列于本章末。

表 9-11　硼的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]
249.7	249.7	ICP	HCL	400	43	249.7	249.7	ICP	ICP	10	22
NS	NS	ICP	HCL	60	4		249.7	ICP	ICP	56	31
249.678	249.773	ICP	PDL	4	6		249.8	ICP	ICP	37	32
249.8	249.8	ICP	HCL	500	13	NS	NS	Hy	HCL	50	130
249.8	249.8	ICP	ICP	56	15	NS	NS	GP	HCL	—	131
NS	NS	ICP	HCL	60	17						

① 文献集中列于本章末。

表 9-12　钡的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献[①]
553.5	553.5	Air/Ac	CWDL	8	97	611.1	506.3	N_2O/Ac	CWDL	500	98
553.5	553.5	H/O/Ar	CWDL	2	97	553.7	553.7	N_2O/Ac	CWDL	40	98
553.5	553.5	MIP	HCL	20	1	553.7	553.7	ICP	CWDL	ND	99

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
585.4	455.4	ICP	CWDL	6	99	455.404	614.172	ICP	PDL	0.7	6
455.4	455.4	ICP	PDL	2	100	597.2	611.1	GF	FLDL	4000 (40ng)	104
614.2	455.4	ICP	PDL	30	100						
416.6	389.2	ICP	PDL	1	101	553.55	553.55	Air/Ac	PDL	100	105
597.2 599.7	507.2	Air-Ac	PDL	4000 (80ng)	102	455.4	455.4	ICP	ICP	8	15
							553.55	N-S/Air/Ac	Xe 150?	10	106
455	455	DCP	PDL	1000	103	455.4	455.4	ICP	ICP	0.9	22
455	585	DCP	PDL	45000	103	455.403	455.403	ICP	PDL	40	107
455	614	DCP	PDL	2000	103	553.7	553.7	N_2O/Ac	PDL	8	29
614	455	DCP	PDL	17	103		455.4	ICP	ICP	8	31
614	585	DCP	PDL	3000	103		455.4	ICP	ICP	5	32
614	614	DCP	PDL	8000	103	NS	NS	ICP	HCL	500	108
455.4	455.4	ICP	HCL	50	43						

① 文献集中列于本章末。

表 9-13 铍的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
234.7	234.7	ICP	HCL	0.8	43	234.9	234.9	W loop	EDL	2000 (4ng)	112
234.9	234.9	S/Air/Ac	ICP	10	44						
234.9	234.9	S/Air/Ac	EDL	10	44	NS	NS	ICP	HCL	0.8	13
234.861	234.861	N_2O/Ac	EDL	40	109		234.9	Ar-S/N_2O/Ac	XeFL	200	16
234.861	234.861	S/N_2O/Ac	EDL	10	110		234.9	Ar-S/N_2O/Ac	Xe 150	60	16
234.861	234.861	N_2O/Ac	HIHCL	500	111	NS	NS	ICP	HCL	0.2	17
234.861	234.861	O_2/Ac	HIHCL	10000	111		234.86	N-S/N_2O/Ac	Xe 300	30	27
234.861	234.861	S/Air/Ac	HIHCL	50000	9		234.8	Ar-S/N_2O/Ac	Xe 500	15	28
234.861	234.861	S/N_2O/Ac	HIHCL	20	9	NS	NS	GF	HIHCL	0.03	83
						235	—	VC	PDL	—	113

① 见本章末"参考文献"。

表 9-14 铋的原子荧光光谱①

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对荧光强度② N-H	相对荧光强度② Ar-H	λ/nm	能级/eV	跃迁	相对荧光强度② N-H	相对荧光强度② Ar-H
206.17	0～6.012	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{5/2}$	6.5	12	298.90	1.416～5.562	$^2D^0_{3/2}$—$^4P_{3/2}$	—	—
222.83	0～5.562	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{3/2}$	—	—	299.33	1.416～5.556	$^2D^0_{3/2}$—$^2D_{5/2}$		
223.06	0～5.556	$^4S^0_{3/2}$—$^2D_{5/2}$	—	—	302.46	1.914～6.012	$^2D^0_{5/2}$—$^4P_{5/2}$	50	100
227.66	0～5.444	$^4S^0_{3/2}$—$^2D_{3/2}$	—	—	306.77	0～4.040	$^4S^0_{3/2}$—$7S^4P_{1/2}$	28	54
262.79	1.416～6.132	$^2D^0_{3/2}$—$^2P_{3/2}$	—	—	339.72	1.914～5.562	$^2D^0_{5/2}$—$^4P_{3/2}$	—	—
269.67	1.416～6.012	$^4D^0_{3/2}$—$^4P_{5/2}$	3	6	351.08	1.914～5.444	$^2D^0_{5/2}$—$^2D_{3/2}$	—	—
278.05	1.416～5.873	$^2D^0_{3/2}$—$8S^4P_{1/2}$	—	—	412.15	2.685～5.692	$^2P^0_{1/2}$—$^2P_{1/2}$	—	—
289.80	1.416～5.692	$^2D^0_{3/2}$—$^2P_{1/2}$	—	—	472.22	1.416～4.040	$^2D^0_{3/2}$—$7S^4P_{1/2}$	—	—
293.83	1.914～6.132	$^2D^0_{5/2}$—$^2P_{3/2}$	—	—					

① 用碘 EDL 激发(用这种光源观察到只有 206.1nm 谱线)。

② 在 Ar-H 扩散中以 302.46nm 线得到的相对荧光强度为 100,则其他谱线的相对强度远低于 5%。

表 9-15 铋的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
	ND	GF	EDL	0.1	114	306.8	306.8	ICP	HCL	50	43
306.772	472.219	GF	PDL	0.016 (0.8pg)	115		—	HyVC	EDL	0.1ng	45
						NS	NS	GDSC	BHCL	10000	119
306.8	306.8	Ar/O_2/H_2	EDL	60	116	302.464	302.464	Ar/Air/H_2	EDL	500	120
	306.8	CGF	Xe 150	10(2ng)	117	302.464	302.464	N_2/Air/H_2	EDL	1000	120
	NDSB	Ar/Air/H_2	EDL	0.005 (0.1ng)	118	306.772	306.772	Air/Ac	HCL	33000	48

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
223.061	223.061	Air/Ac	HCL	40000	48		223.1	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	8000	53
306.772	306.772	S/Air/Ac	HCL	5000	48	223.1	223.1	Ar-S/Air/Ac	EDL	12000	53
223.061	223.061	S/Air/Ac	HCL	14000	48	307.7	307.7	CGF	EDL	0.6	54
306.772	306.772	Air/Ac	HCL	220000	49	223.1	223.1	GF	EDL	1.2	122
306.772	306.772	S/Air/Ac	HCL	55000	49	306.8	306.8	W spiral	EDL	6pg	123
	306.772	Ar/Air/H_2	Xe 150	10000	50	NS	NS	HG	HCL	15ng	56
306.772	306.772	Ar/Air/H_2	EDL	700	51	—	—	Ar/Air/H_2	EDL	—	58
306.77	306.77	Air/Ac	EDL	500	121	NS	ND	Hy+Ar	NS	0.2ng	124
306.77	306.77	N-S/Air/Ac	EDL	40	121	NS	ND	FI-Hy	HCL	0.06 (0.03ng)	62
223.06	223.06	Air/Ac	EDL	2000	121						
223.06	223.06	N-S/Air/Ac	EDL	200	121	NS	ND	Hy	EDL	—	61
306.8	306.8	W loop	EDL	20 (0.04ng)	112	NS	NS	Hy	NS	50	68
						NS	NS	Hy	EDL	500	125
396.8	396.8	Air/H_2	HIHCL	100	12	NS	NS	HG	MIP	15	126
NS	NS	ICP	HCL	2	17	NS	NS	HG	HCL	0.46	64
	306.9	N-S/Air/Ac	Xe	300	52	223.06	299.334	GC	LE	0.00005	127
306.9	306.9	N S/Air/Ac	EDL	300	52	223.06	299.334	GC	LE	0.00005	128
306.8	306.8	Air/Ac	PDL	3	29	223.1	299.3	GC	XeCL	0.00005	129

① 见本章末"参考文献"。

表 9-16 碳的原子荧光测定参数[208,209]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	注 释
165.7	165.7	CO Discharge	PDL	
193.1	247.9	C Arc	ArFL	<10^3 个原子/cm^3

表 9-17 钙的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
422.7	422.7	MIP	HCL	20	1	422.7	422.7	ICP	HCL	0.4	13
	422.7	MIP	Xe 200	20	1	422.6	422.6	N-S/Air/Ac	DCP	8	81
422.7	422.7	Air/Ac	PDL	0.03	200	422.7	422.7	ICP	HCL	1.4	183
396.8 370.6	373.7	ICP	PDL	0.007	101	422.7	422.7	ICP	ICP	0.5	15
							422.67	N-S/Air/Ac	Xe 150?	50	106
422	422	DCP	PDL	3	103	393.4	393.4	ICP	ICP	0.4	22
422.7	422.7	Air/Ac	PDL	0.01	201	422.67	422.67	ICP	ICP	60	23
NS	NS	Air/Ac	HCL	50	69	393.37	393.37	ICP	ICP	2	23
422.7	422.7	S/Air/Ac	HCL	7	202		422.67	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	2	185
422.7	422.7	ICP	HCL	0.08	43	NS	NS	ICP	ICP	0.4	24
422.7	422.7	S/Air/Ac	ICP	20	44	393.37	393.37	ICP	PDL	8	107
422.7	422.7	S/Air/Ac	EDL	20	44	422.6	422.6	N-S/Air/Ac	ICP	4	26
	422.7	Air/Ac	Xe 300	10	157	422.7	422.7	Air/Ac	ICP	23	205
426.637	426.637	Air/H_2	EDL	20	51	422.7	422.7	Air/Ac	PDL	0.08	29
	426.637	Air/H_2	Xe 900	20	203		422.67	N-S/Air/Ac	Xe 300	2	27
426.673	426.673	Air/Ac	HCL	100	49		422.7	Air/Ac	Xe 900	300	30
	426.637	Ar/Air/Ac	HCL	50	49	NS	NS	GF	HIHCL	0.0001	83
	426.637	Air/H_2	Xe 150	10000	50		422.7	ICP	ICP	0.5	31
426.673	426.673	Air/H_2	PDL	5	10		422.7	ICP	ICP	0.3	32
585.3	585.3	GF	FLDL	2300(23ng)	104	NS	422.7	ICP	—	—	206
422.7	422.7	Air/H_2	PDL	10	11	422.7	422.7	ICP	HCL	3	207
	422.7	Air/Ac	Xe 500	500	171	NS	NS	ICP	HCL	—	197
	422.7	Air/H_2	Xe 450	20	204						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-18 镉的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
228.8	228.8	$Ar/Air/H_2$	EDL	0.05	132
228.8	228.8	GF	EDL	0.00001	114
	ND SB	GF	EDL	0.0001	133
228.8	228.8	Air/H_2	HgDL	5	134
228.8	228.8	$Ar/Air/H_2$	MVL	0.013	135
NS	NS	Air/Ac	EDL	5	69
NS	NS	Air/Ac	HCL	100	69
228.8	228.8	Arc atomizer	HCL	0.3	136
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	1	35
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	10	137
228.8	228.8	CGF	EDL	0.3	138
NS	NS	$S/Air/H_2$	HCL	20	139
NS	NS	Pt loop	HCL	8	139
	228.8	CGF	Xe 150	1	117
	228.8	Air/Ac	EW	7000	140
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	1.3	141
228.8	228.8	O_2/H_2	EDL	100	142
228.8	228.8	O_2/Ac	EDL	300	142
228.8	228.8	Air/H_2	EDL	200	142
228.8	228.8	Air/NG	EDL	100	142
283	283	Air/H_2	HCL	8	143
	ND	N_2-S/Air/Ac	BHCL	0.1	40
	ND	N_2-S/Air/Ac	EDL	0.2	40
	ND	N_2-S/Air/Ac	EDL	0.01	144
	ND SB	GF	HFDL	0.1pg	145
	NS	N_2O/H_2	Xe 300	10	146
228.8	228.8	ICP	HCL	0.8	43
228.8	228.8	S/Air/Ac	ICP	6	44
228.8	228.8	S/Air/Ac	EDL	1	44
NS	NS	ICP	HCL	0.1	4
228.8	228.8	$N_2/Air/Ac$	EDL	70	147
228.8	228.8	$N_2/Air/Ac$	TGL	0.5	147
	228.8	$He/O_2/Ac$	Xe 300	50	148
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	—	149
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	0.5	150
228.8	228.8	$Ar/Air/H_2$	EDL	0.05	150
228.8	228.8	Air/H_2	EDL	0.7	151
228.8	228.8	GF	EDL	0.2	152
	228.8	N_2O/Ac	Xe 300	40	153
	228.8	Air/Ac	Xe 300	30	153
228.8	228.8	GF	EDL?	0.0014	154
228.8	228.8	Air/Ac	ICP	8	155
	228.8	$He/O_2/Ac$	Xe 300	50	156
	228.8	Air/Ac	Xe 300	3000	156
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	0.05	157
228.8	228.8	ICP	HCL	0.3	158
228.8	228.8	ICP	HCL	1	159
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	0.02	160
228.802	228.802	S/Air/Ac	MVL	0.5	161
	228.802	$Ar/Air/H_2$	Xe 900	80	162
	228.802	Air/Prop	Xe 150	200	163
228.802	228.802	$Ar/Air/H_2$	EDL	—	164
228.802	228.802	Air/Ac	HCL	60	48
228.802	228.802	Air/Ac	MVL	2	48
228.802	228.802	S/Air/Ac	HCL	20	48
228.802	228.802	S/Air/Ac	HCL	100	49
228.802	228.802	Air/Ac	HCL	150	49
	228.802	Air/H_2	Xe 150	80	50
228.802	228.802	O_2/H_2	EDL	0.001	51
228.802	228.802	Air/H_2	PHCL	3	165
228.8	228.8	ICP	HCL	0.8	166
228.8	228.8	ICP	HCL	1.5	166
228.802 643.847	361.051 361.288	GF	PDL	0.000018	167
228.8	228.8	$Ar/Air/H_2$	EDL	0.05	168
228.8	228.8	Air/Ac	EDL	0.5	168
228.8	228.8	Pt loop	MVL	40(0.1ng)	169
228.8	228.8	Pt loop	EDL	0.05pg	170
228.8	228.8	Pt loop	EDL	0.01 (0.02pg)	112
	228.8	Air/Ac	Xe 500	10000	171
228.8	228.8	$Ar/Air/H_2$	EDL	0.1	172
228.8	228.8	Air/H_2	EDL	0.002	173
228.8	ND SB	GF	EDL	0.1pg	174
228.8	ND SB	Air/H_2	MVL	1	175
228.8	228.8	Air/H_2	MVL	0.01	176
228.8	228.8	O_2/H_2	MVL	0.2	177
228.8	228.8	O_2/H_2	MVL	100	178
228.8	228.8	O_2/Ac	MVL	50	178
228.8	228.8	Air/H_2	Pulsed EDL	90	179
	228.8	N-S/Air/Ac	Xe 300	50	180
228.8	228.8	$Ar/Air/H_2$	ICP	<0.1	181
	326.1	GF+MNP	Xe 300	0.5mg	14
228.8	228.8	N S/Air/Ac	DCP	4	14
228.8	ND	Air/Ac	EDL	2	182
228.8	228.8	ICP	HCL	1.8	183
228.8	228.8	Air/Ac	HCl	70	184
	228.8	Ar-S/Air/Ac	XeFL	30	16
	228.8	Ar-S/Air/Ac	Xe 150	10	16
NS	NS	ICP	HCL	<0.1	17
	228.8	N-S/Air/Ac	Xe	4	52
228.8	228.8	N-S/Air/Ac	EDL	2	52
228.8	228.8	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	10	185
228.8	228.8	N-S/Air/Ac	ICP	0.8	26
228.8	228.8	GF	Xe 150	5(2.5pg)	186
228.8	228.8	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	6	28
228.8	228.8	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	1.4	187
228.8	228.8	Air/Ac	PDL	8	29
228.8	228.8	N-S/Air/Ac	Xe 300	8	27
228.8	228.8	CGF	EDL	0.04	54
228.8	228.8	Air/H_2	EDL	1	55
228.1	228.1	GF	EDL	0.02(0.01pg)	188
228.8	228.8	Air/H_2	EDL	0.02	189
NS	NS	GF	HIHCL	0.00003	83
228.8	228.8	ICP	EDL	0.4	190
228.8	228.8	N-S/Air/Ac	EDL	0.05	191
228.8	228.8	W spiral	EDL	0.03(pg)	192
NS	ND	NS	NS	0.2	193
NS	NS	W·S	EDL	0.003	194
NS	228.802	GC	LE	0.00007	195
NS	326.105	GC	LE	0.00031	195
228.8	228.8	ETA	LE	—	196
NS	NS	ICP	HCL	—	197
—	228.8	MIP	HCL	0.26	198
NS	NS	Hy	NS	0.008	199
NS	228.8	GC	XeCL	0.00007	129

① 见本章末“参考文献”。

表 9-19 铈的原子荧光测定参数及检出限[210,211]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/ (ng·ml^{-1})	注释
371.637	394.215	N_2O/Ac	PDL	500	离子
371.637	395.254	N_2O/Ac	PDL	500	离子
407.59	401.24	ICP	PDL	400	离子

表 9-20 氯的原子荧光测定参数

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	注释	文献①
210	210	VC	PDL	10^{13}个原子/cm^3	213
120.14	120.14	VC	MIP		214
134.72	134.72	VC	MIP		214
233.3	725～775	Plasma	PDL	双光子	215
138.0	138.0	VC	EDL	3×10^9 个原子/cm^3	216

① 见本章末"参考文献"。

表 9-21 钴的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①,②
240.73	0～5.149	$a^4F_{9/2}—x^4G^0_{11/2}$	91	100
241.16	0.101～5.240	$a^4F_{7/2}—x^4G^0_{9/2}$	59	38
241.45	0.174～5.308	$a^4F_{5/2}—x^4G^0_{7/2}$	54 }	15
241.53	0.224～5.356	$a^4F_{3/2}—x^4G^0_{5/2}$	39 }	
242.49	0～5.111	$a^4F_{9/2}—x^4F^0_{9/2}$	61	50
243.22	0.101～5.197	$a^4F_{7/2}—x^4F^0_{7/2}$	42	16
252.14	0～4.916	$a^4F_{9/2}—x^4D^0_{7/2}$	100	45
252.90	0.101～5.002	$a^4F_{7/2}—x^4D^0_{5/2}$	58	7

① 用高强度空心阴极灯激发。

② 空气 A-H 火焰。

表 9-22 钴的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
304.4	340.5	GF	PDL	0.002(0.06ng)	226
240.7	240.7	MIP	HCL	1000	1
304.4	340.5	GF	PDL	0.2	227
304	341	GF	PDL	0.03(0.3pg)	228
308.262	345.350	GF	PDL	0.004(0.2pg)	115
240.7	240.7	Air/Ac	EDL	10	35
NS	NS	S/Air/Ac	HCL	6	218
	240.7	Air/Ac	EW	10000	140
241	241	Air/H_2	HCL	40	143
346.6	345.3 346.6	Air/Ac	Xe 2500	5	229
240.7	240.7	ICP	HCL	5	43
240.7	240.7	S/Air/Ac	HCL	700	230
240.7	240.7	S/Air/Ac	ICP	20	44
240.7	240.7	S/Air/Ac	EDL	10	44
	240.7	S/Air/Ac	Xe 300	30	219
NS	NS	ICP	HCL	1	4
NS	NS	GDSC	BHCL	10000	118
240.725	240.725	Air/Prop	EDL	5	231
240.725	240.725	Air/H_2	EDL	5	231
240.725	240.725	Air/Ac	EDL	10	231
240.725	240.725	Air/H_2	HIHCL	20	232
240.725	240.725	Ar/O_2/H_2	HIHCL	10	232
240.725	240.725	Air/Ac	HIHCL	50	232
240.725	240.725	Ar/O_2/H_2	HIHCL	10	232

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
240.725	240.725	N_2O/H_2	EDL	40	7
240.725	240.725	O_2/H_2	EDL	2000	233
240.725	240.725	Ar/Air/H_2	EDL	100	51
240.725	240.725	Air/Ac	HCL	1000	48
240.725	240.725	Air/Ac	HIHCL	40	48
240.725	240.725	S/Air/Ac	HCL	150	48
240.725	240.725	S/Air/Ac	HIHCL	15	48
240.725	240.725	Air/Ac	HCL	2500	49
240.725	240.725	S/Air/Ac	HCL	1700	49
	240.725	Ar/Air/H_2	Xe 150	1000	50
347.453	357.536	N_2O/Ac	PDL	200	10
357.536	357.536	N_2O/Ac	PDL	50000	10
304	341	GF	PDL	0.025(5pg)	234
589.0	589.0	GF	FLDL	530000(5.3mg)	104
304.4	340.5	GF	PDL	0.2	235
304.4	304.4	GF	PDL	0.002	235
	242.5	Air/Ac	Xe 500	20000	171
240.7	240.7	Air/H_2	HIHCL	500	12
	240.7	GF+MNP	Xe 300	460ng	14
240.7	240.7	N-S/Air/Ac	Xe 300	31	81
240.7	240.7	ICP	ICP	21	15
—	240.7	Ar-S/Air/Ac	XeFL	100	16
—	240.7	Ar-S/Air/Ac	Xe 150	20	16
NS	NS	ICP	HCL	0.4	17
	240.7	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	1000	236

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]
240.72	240.72	ICP	ICP	40	23	NS	NS	GF	Laser	0.02	238
228.62	228.62	ICP	ICP	300	23	NS	NS	Gy	NS	0.01ng	246
	240.72	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	30	185	NS	304.4	NS	Laser	0.02ng	226
NS	NS	ICP	ICP	20	24	NS	NS	NS	CWDL	0.3fg	247
240.7	240.7	N-S/Air/Ac	ICP	11	26	NS	NS	GF	LE	0.500pg	240
	240.1	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	15	28	NS	NS	MIP	XeFL	1ng	241
359.3	359.3	Air/Ac	PDL	1000	29	NS	304.4	电热石墨坩埚	激光光源	<3~10ng	242
	240.27	N-S/Air/Ac	Xe 300	20	27	304.4	340.5	Ar/Air	激光光源	2pg	243
	240.7	GF	Xe 150	10(0.01ng)	186	304	340.5	GT ETA	LE	20fg	244
240.7	240.7	CGF	EDL	3	54	NS	NS	GT-ETA	LE	0.001	245
	240.7	ICP	ICP	21	31	NS	NS	ETA	LE	0.3pg	239
240.7	240.7	Ar-S/Air/Ac	EDL	10	237						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-23 铬的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]
357.9	357.9	MIP	HCL	2000	1
428.9	428.9	LAP	PDL		217
359.3	359.3	Air/H_2	HgDL	5000	134
359.3 359.4	359.3 359.4	Air/Ac	EDL	5	35
NS	NS	S/Air/Ac	HCL	6	218
	357.9	CGF	Xe 150	40	117
357.9	357.9	Air/H_2	HCL	200	143
357.9	357.9	ICP	HCL	10	43
357.9	357.9	S/Air/Ac	ICP	30	44
357.9	357.9	S/Air/Ac	EDL	9	44
	357.9	S/Air/Ac	Xe 300	4	219
NS	NS	ICP	HCL	1	4
	357.8	He/O_2/Ac	Xe 300	2000	148
	425.43	N_2O/Ac	Xe 300	5	153
	425.43	Air/Ac	Xe 300	400	153
NS	NS	GDSC	BHCL	4000	119
	357.9	He/O_2/Ac	Xe 300	2000	156
	357.9	Air/Ac	Xe 300	60000	156
357.9	357.9	ICP	HCL	5	158
NS	357.9 359.4 360.5	ICP	HCL	100	5
357.869	357.869	N_2O/H_2	EDL	50	7
357.869	357.869	Air/H_2	BHCL	1000	220
357.869	357.869	S/Air/Ac	EDL	5	221
427.481	427.481	S/Air/Ac	EDL	100	221
359.349	359.349	Air/H_2	EDL	500	221
359.349	359.349	S/Air/Ac	EDL	100	221
359.349	359.349	Air/Ac	EDL	50	221
425.433	425.433	Air/Ac	HCL	1000	49
357.869	357.869	Air/Ac	HCL	14000	49
425.433	425.433	S/Air/Ac	HCL	500	49
357.869	357.869	S/Air/Ac	HCL	5700	49
359.349	359.349	Air/H_2	EDL	10000	51

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]
357.869	357.869	Air/H_2	PDL	20	10
359.349	359.349	Air/H_2	PDL	20	10
428.9	428.9	LAP	PDL	1000	222
359.3	359.3	Air/H_2	PDL	30	11
—	359.3	Air/Ac	Xe 500	3000	171
—	357.9	Ar/Air/H_2	Xe 150	18000	223
357.9	357.9	Air/H_2	HIHCL	100000	12
359	359	Ar/S/Air/Ac	EDL	2500	224
—	357.9	N-S/Air/Ac	Xe 300	50	180
357.9	357.9	ICP	HCL	6	13
—	357.9	GF+MNP	Xe 300	5ng	14
357.8	357.8	N-S/Air/Ac	DCP	11	81
357.9	357.9	ICP	ICP	8	15
—	357.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 150	10	16
NS	NS	ICP	HCL	0.4	17
359.4	359.4	ICP	HCL	100	19
357.9	359.4	ICP	HCL	400	20
357.9	ND	ICP	HCL	100	20
267.7	267.7	ICP	HCL	10000	20
359.9	359.9	ICP	ICP	10	22
357.87	357.87	ICP	ICP	900	23
205.55	205.55	ICP	ICP	2000	23
—	357.87	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	7	185
NS	NS	ICP	ICP	4	24
357.8	357.8	N-S/Air/Ac	ICP	2	26
—	357.9	GF	Xe 150	5(2.5pg)	186
—	357.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	1.5	28
—	357.9	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	4	187
359.3	359.3	Air/Ac	PDL	1	29
—	357.87	N-S/Air/Ac	Xe 300	10	27
357.9	357.9	Air/H_2	EDL	10	54
—	357.9	Air/Ac	Xe 900	600	30
NS	ND	GDSC	HIHCL	30000	225
—	357.9	ICP	ICP	8	31
—	357.9	ICP	ICP	5	32
357.9	357.9	ICP	HCL	2	207

① 见本章末"参考文献"。

表 9-24 铯的原子荧光测定参数及检出限[212]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限	
				$c/(ng \cdot ml^{-1})$	m/ng
455.5	455.5	GF	PDL	0.02	0.0012

表 9-25 铜的原子荧光光谱

λ/ nm	能 级/ eV	跃 迁	相对光源发射强度[1]	相对荧光强度[1]	
				Ar-O-H	空气-乙炔
216.51	0～5.725	$4s^2S_{1/2}—4s4p^2D^0_{3/2}$	9	0.34	0.45
217.89[2]	0～5.688	$4s^2S_{1/2}—4s4p^2P^0_{3/2}$	13	1.25	1.5
218.17[2]	0～5.681	$4s^2S_{1/2}—4s4^2P^0_{1/2}$	7		
222.57	0～5.569	$4s^2S_{1/2}—4s4p^2D^0_{1/2}$	12	0.24	0.30
249.22	0～4.973	$4s^2S_{1/2}—4s4p^4D^0_{3/2}$	23	—	—
324.75	0～3.817	$4s^2S_{1/2}—4p^4P^0_{3/2}$	100	100	100
327.40	0～3.786	$4s^2S_{1/2}—4p^2P^0_{1/2}$	64	50.2	50.7
510.55	1.389～3.817	$4s^{22}D_{5/2}—4p^2P^0_{3/2}$	—	—	—
578.21	1.642～3.786	$4s^{22}D_{3/2}—4p^2P_{1/2}$	—	—	—

① 高强度空心阴极灯激发。

② 谱线在荧光光谱中没有分辨。

表 9-26 铜的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献[1]
324.7	510.5	GF	PDL	0.002(0.15ng)	226
578.2	327.4	N_2O/Ac	CWDL	100000	98
324.8	324.8	ICP	PDL	0.7	34
327.4	324.8	ICP	PDL	0.4	34
325	510	GF	PDL	0.06(0.6ng)	228
324.8	324.8	Air/H_2	HgDL	100	134
324.755	510.554	GF	PDL	0.016(0.8pg)	115
NS	NS	Air/Ac	HCL	10	69
324.7	324.7	Air/Ac	HCL	50	248
324.75	324.75	O_2/Ar/H_2	HCL	1.5	249
324.75	324.75	Air/H_2	HCL	3	249
324.75	324.75	Air/Ac	HCL	6	249
324.75	324.75	Air/Ac	HCL	1	250
NS	NS	S/Air/Ac	HCL	4	218
324.8	324.8	S/Air/Ac	HCL	10	202
324.8	324.8	S/Air/Ac	HCL	30	251
324.8	324.8	CGF	EDL	80	138
—	324.7	CGF	Xe150	2	117
324.75	324.75	Air/Ac	—	3	252
—	324.5	S/Air/Ac	Xe150	20	253
324.8	324.8	Air/H_2	HCL	5	143
—	422.67	Air/Ac	Xe2500	5	229
—	324.7	Air/Ac	Xe2500	20	229
—	NS	N_2O/H_2	Xe300	10	146
324.8	324.8	ICP	HCL	1	43
324.7	324.7	S/Air/Ac	HCL	390	230
324.8	324.8	S/Air/Ac	ICP	8	44
324.8	324.8	S/Air/Ac	EDL	2	44
NS	NS	ICP	HCL	0.4	4
—	324.7	He/O_2/Ac	Xe300	300	148
—	324.75	N_2O/Ac	Xe300	80	153
	324.75	Air/Ac	Xe300	300	153
NS	NS	GDSC	BHCL	2000	119
	324.7	He/O_2/Ac	Xe300	300	156
	324.7	Air/Ac	Xe300	9000	156
324.9	324.9	ICP	HCL	1	158
324.8	324.8	ICP	HCL	2	159
Ns	324.8 327.4	ICP	HCL	50	5
324.754	324.754	Air/H_2	HIHCL	1	254
324.754	324.754	Ar/Air/H_2	EDL	5	51
324.754	324.754	O_2/H_2	HIHCL	100	111
324.754	324.754	Air/H_2	HIHCL	500	111
324.754	324.754	N_2O/H_2	EDL	30	7
	324.754	Air/Prop	Xe150	1000	163
	324.754	S/Air/Ac	HCL	50	49
324.754	324.754	Air/Ac	HCL	140	49
324.754	324.754	Ar-S/O_2/H_2	HFHC (PSB)	0.5	255
324.754	324.754	Ar-S/O_2/H_2	HIHCL	—	255
	324.754	Ar/Air/H_2	Xe 150	200	50
324.754	324.754	O_2/H_2	PHCL (PSB)	20	165
324.9	324.9	ICP	HCL	3.0	166
324.9	324.9	ICP	HCL	4.5	166
325	510	GF	PDL	0.3(6pg)	234
325	325	GF	PDL	0.02(4pg)	234
578.2	578.2	GF	FLDL	90000(0.9mg)	104
324.7	324.7	W loop	EDL	100(0.2ng)	112
	324.75	Air/Ac	Xe 500	3000	171
	327.40	Air/Ac	Xe 500	2000	171
	324.7	Ar/Air/H_2	Xe 150	600	223
	324.8	Kerosene	Xe 450	4	256
	324.8	Kerosene	Xe 450	40	256
324.8	324.8	Air/H_2	HIHCL	1	12
324.8	324.8	Ar/Air/H_2	HIHCL	3	257
324.8	324.8	Air/H_2	HIHCL	20	257
—	324.7	Air/H_2	Xe 150	5300	258
—	324.8	N-S/Air/Ac	Xe 300	100	180
—	327.4	GF+MNP	Xe 300	15ng	14
324.7	324.7	N-S/Air/Ac	DCP	8	81
324.7	324.7	ICP	HCL	6.2	183
324.8	324.8	Air/Ac	HCL	100	184
NS	NS	ICP	HCL	0.2	17
324.8	327.4	GF	PDL	8pg	18
324.8	324.8	ICP	HCL	50	19
—	324.75	N-S/Air/Ac	Xe 150	27	106
324.9	324.9	ICP	HCL	20	20
324.9	ND	ICP	HCL	0.6	20
224.7	224.7	ICP	HCL	6000	20
324.8	327.4	GF	PDL	0.4(2pg)	21
—	324.8	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	70	236
324.7	324.7	ICP	ICP	0.4	22
324.75	324.75	ICP	ICP	30	23
—	324.75	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	5	185
NS	NS	ICP	ICP	4	24

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
	324.7	GF+Air/Ac	Xe 300	90(0.09ng)	25	NS	ND	GDSC	HIHCL	5000	225
324.7	324.7	N-S/Air/Ac	ICP	2	26	NS	NS	GF	HIHCL	0.005	83
—	324.75	N-S/Air/Ac	Xe 300	7	27		324.7	ICP	ICP	2	31
324.7	324.7	Air/Ac	PDL	1	29	324.7	324.7	GF	EDL	0.08	121
—	324.7	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	4	187		324.7	GF	Xe 150	900	121
—	324.7	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	1.5	28		324.8	ICP	ICP	2	32
	324.7	GF	Xe 150	6(3pg)	186	NS	NS	ETA	LE	—	259
324.8	324.8	Air/H_2	EDL	2	55	NS	NS	W-S	EDL	5	194
—	324.8	Air/Ac	Xe 900	50	30	NS	NS	ICP	HCL	—	197
324.7	324.7	GF	EDL	0.6(0.3pg)	188	NS	NS	ICP	HCL	50	260
324.7	324.7	Air/H_2	EDL	1	189						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-27 镝的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
364.541	353.603	N_2O/Ac	PDL	300	210	407.80	394.47	ICP	PDL	400	211
418.678	418.678	N_2O/Ac	PDL	600	210	—	—	ICP	LE	—	261

① 见本章末"参考文献"。

表 9-28 铒的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
400.797	400.797	N_2O/Ac	PDL	500	210	404.84	374.26	ICP	PDL	260	211
369.264	337.276	N_2O/Ac	PDL	2500	210						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-29 铕的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
287.9	536.1	GF	PDL	10(6pg)	226	420.505	393.045	N_2O/Ac	PDL	200	210
443.556 306.911	333.875	ICP	PDL	250	263	305.49	290.67	ICP	PDL	72	211
						NS	NS	GD	LE	2fg	264
459.403	462.722	N_2O/Ac	PDL	20	210	NS	NS	ICP	NS	24	265

① 见本章末"参考文献"。

表 9-30 铁的原子荧光光谱

h/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度①		相对荧光强度	
			文献[473]①	文献[474]②	文献[473]①③	文献[474]②④
248.33	0~4.991	$a^5D_4—x^5F_5^0$	49	100[⑤]	100	100[⑤]
248.82	0.052~5.033	$a^5D_3—x^5F_4^0$	29		46	
248.98	0.121~5.099	$a^5D_0—x^5F_1^0$	25[③]		23[③]	
249.06	0.087~5.064	$a^5D_2—x^5F_3^0$				
252.29	0~4.913	$a^5D_4—x^5D_4^0$	33	35[⑤]	34	51.8[⑥]
252.74	0.052~4.955	$a^5D_3—x^5D_3^0$	12		12	
271.90	0~4.558	$a^5D_4—y^5P_3^0$	36	31[⑤]	15	5.0[⑥]
272.09	0.052~4.607	$a^5D_2—y^5P_3^0$	—			
298.36	0~4.154	$a^5D_4—y^5D_3^0$	—	23		7.0
302.05[⑤]	0.087~4.191	$a^5D_2—y^5D_2^0$	84[③]	24[⑤]	12[③]	8.5[⑥]
302.06[⑤]	0~4.103	$a^5D_4—y^5D_3^0$				
302.11[⑤]	0.052~4.154	$a^5D_3—y^5D_3^0$				
356.54[⑤]	0.958~4.434	$a^5F_3—z^5G_4^0$	—	8[⑤]	—	5.4[⑥]
357.01[⑤]	0.915~4.386	$a^5F_4—z^5G_5^0$	—		—	
371.99	0~3.332	$a^5D_4—z^5F_5^0$	—	135	—	32.8

续表

h/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度①		相对荧光强度	
			文献[473]①	文献[474]②	文献[473]①④	文献[474]②④
373.49	0.859～4.177	$a^5F_5—y^5F_5^0$	62	—	6	—
373.71	0.052～3.368	$a^5D_3—z^5F_4^0$	100	—	7	—
382.04⑤	0.859～4.103	$a^5F_5—y^5D_4^0$	…	127⑤	—	19.3⑤
382.44⑤	0～3.241	$a^5D_4—z^5D_3^0$	—		—	
382.59⑤	0.915～4.154	$a^5F_4—y^5D_3^0$			—	
385.99	0～3.211	$a^5D_4—z^5D_4^0$	—	50		2.3

① 用高强度空心阴极灯激发。

② 在空气-乙炔火焰中，用 EDL 激发。

③ 在空气-H 火焰中。

④ 在空气-乙炔火焰中。

⑤ 未分辨的发射及荧光光谱谱线。

表 9-31 铁的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
296.7	373.5	GF	PDL	0.001(0.1pg)	226
248.3	248.3	MIP	HCL	600	1
296.7	373.5	GF	PDL	0.025(0.75pg)	287
296.7	373.5	Air/Ac	PDL	0.2	288
296.7	373.5	ICP	PDL	50	100
296.7	373.5	Air/Ac	PDL	0.07	200
296	373	DCP	PDL	72	103
248.3	248.3	Air/H_2	HgDL	1000	134
302.064	382.043	GF	PDL	0.02(1pg)	115
NS	NS	Air/Ac	HCL	80	69
248.0	248.0	Air/Ac	EDL	10	35
248.3	248.3	Air/Ac	HCL	30	248
NS	NS	S/Air/Ac	HCL	17	218
248.3	248.3	S/Air/Ac	HCL	100	251
248.3	248.3	CGF	EDL	4000	138
248.3	248.3	S/Air/Ac	HCl	50	289
—	252.3	CGF	Xe 150	20	117
248	248	Air/H_2	HCL	60	143
373.7	371.9 373.7	Air/Ac	Xe 2500	1000	229
—	ND	GF-N_2-S/Air/Ac	—	4ng	144
248.3	248.3	ICP	HCL	10ng	43
248.3	248.3	S/Air/Ac	HCL	3200	230
248.6	248.6	S/Air/Ac	EDL	80	44
248.6	248.6	S/Air/Ac	EDL	20	44
—	248.3	Ar/Air/H_2	Xe 300	0.012	230
NS	NS	ICP	HCL	1	4
—	248.3	He/O_2/Ac	Xe 300	1000	148
—	371.99	N_2O/Ac	Xe 300	150	153
…	371.99	Air/Ac	Xe 300	700	153
NS	NS	GDSC	BHCL	100000	119
—	248.3	He/O_2/Ac	Xe 300	1000	156
	248.3	Air/Ac	Xe 300	20000	156
	248.3	Air/Ac	Xe 300	4	157
248.3	248.3	ICP	HCL	5	158
279.5	279.5	ICP	HCL	17	159
NS	248.3 248.8 249.1	ICP	ICP	10	5
248.327	248.327	Air/H_2	HIHCL	20	232
271.902	271.902	Air/H_2	HIHCL	20	232
248.327	248.327	Ar/O_2/H_2	HIHCL	20	232

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
248.327	248.327	Air/Ac	HIHCL	80	232
248.327	248.327	Ar/O_2/H_2	HIHCL	20	232
248.327	248.327	Ar/Air/H_2	EDL	300	291
248.327	248.327	N_2/Air/H_2	EDL	—	7
	248.327	Air/H_2	Xe 900	2000	203
248.327	248.327	Air/Ac	HCL	3000	48
248.327	248.327	S/Air/Ac	HCL	800	48
248.327	248.327	S/Air/Ac	HIHCL	50	48
248.327	248.327	Air/Ac	HCL	450	49
248.327	248.327	S/Air/Ac	HCL	150	49
	248.327	Air/H_2	Xe 150	5000	50
371.934	371.994	Air/H_2	PDL	30	10
372.0	372.0	Air/H_2	PDL	300	11
248.3	248.3	Air/Ac	EDL	9	292
372.0	372.0	Air/Ac	EDL	240	292
	248.3	Ar/Air/H_2	Xe 150	2000	223
	248.3	Kerosene	Xe 450	40	256
	248.3	Kerosene	Xe 450	160	256
	248.3	N-S/Air/Ac	Xe 300	200	180
248.3	248.3	N-S/Air/Ac	DCP	7	81
248.3	248.3	ICP	HCL	16	183
248.3	248.3	ICP	ICP	19	15
248.3	248.3	Air/Ac	HCL	600	184
NS	NS	ICP	HCL	0.3	17
248.3	248.3	ICP	HCL	10	19
	371.99	N-S/Air/Ac	Xe 150?	165	106
	248.3	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	2000	236
248.33	248.33	ICP	ICP	1300	23
259.94	259.94	ICP	ICP	100	23
	248.33	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	20	185
NS	NS	ICP	ICP	6	24
NS	NS	ICP	ICP	5	24
248.3	248.3	N-S/Air/Ac	ICP	6	26
	248.33	N-S/Air/Ac	Xe 300	20	27
296.5	373.5	Air/Ac	PDL	30	29
	248.3	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	10	28
	248	GF	Xe 150	10(5pg)	186
248.3	248.3	Air/H_2	EDL	20	189
NS	NS	GF	HIHCL	0.002	83
	248.3	ICP	ICP	19	31
248.3	—	ICP	HCL	7	207
		ETA	LE	1fg	269

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
NS	NS	ETA	LE	—	259	NS	NS	MIP	XeFL	0.5ng	241
NS	NS	Hy	NS	2pg	246	NS	296.7	电热石墨坩埚	激光光源	3～10ng	242
NS	NS	NS	CWDL	1fg	293	NS	NS	Ar/ion	EDL	0.004	294

① 见本章末“参考文献”。

表 9-32 镓的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
287.4	294.42 294.36	GF	PDL	1.0(10pg)	2	417.206	417.206	S/Air/Ac	MVL	500	48
						294.364	294.364	S/Air/Ac	MVL	10000	48
417.2	417.2	Air/Ac	EDL	1000	35	403.298	417.205	Ar/H_2	PDL	20	10
417.206	417.206	O_2/H_2	PDL	1000	233	403.298	403.298	Ar/H_2	PDL	100	10
287.424	294.418	ICP	PDL	1	6	403.2	403.2	Ar/H_2	PDL	300	11
417.206	417.206	N_2O/H_2	EDL	300	7	417.2	403.3	Ar/H_2	EDL	20	267
403.298	403.298	Ar/H_2	MVL	—	266	403.3	403.3	Pt loop	EDL	0.1mg	170
417.206	417.206	$Ar/Air/H_2$	EDL	—	164	417.2	417.2	Pt loop	EDL	10000(20ng)	112
417.206	417.206	Air/Ac	HCL	40000	48	403.3	417.2	Air/Ac	PDL	0.9	29
294.364	294.364	Air/Ac	HCL	1000000	48	417.2	417.2	Ar/H_2	EDL	50	189
417.206	417.206	S/Air/Ac	HCL	20000	48	NS	NS	GT-ETA	LE	1fg	268
294.364	294.364	S/Air/Ac	HCL	100000	48			GT-ETA	LE	—	269
417.206	417.206	Air/Ac	MVL	700	48						
294.364	294.364	Air/Ac	MVL	20000	48						

① 见本章末“参考文献”。

表 9-33 钆的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	注 释	文献①
376.839	336.223	N_2O/Ac	PDL	800	离子	210
376.839	368.413	N_2O/Ac	PDL	5000	离子	210
407.84	354.58	ICP	PDL	75	离子	211
—	—	ICP	LE		与 ICP-AES 的结果进行比较	261

① 见本章末“参考文献”。

表 9-34 锗的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①,②
249.80	0～4.962	$^3P_0—^1P_1^0$	8	1
259.25	0.069～4.850	$^3P_1—^3P_2^0$	48	34
265.12③ 265.16③	0.171～4.850 0～4.674	$^3P_2—^3P_2^0$ $^3P_0—^3P_1^0$	100	100
269.13	0.069～4.674	$^3P_1—^3P_1^0$	28	19
270.96	0.069～4.643	$^3P_1—^3P_0^0$	37	31
275.46	0.171～4.674	$^3P_2—^3P_1^0$	40	35
303.91	0.883～4.962	$^1D_2—^1P_1^0$	69	35
326.95	0.883～4.674	$^1D_2—^3P_1^0$	13	12

① 用高强度空心阴极灯激发。

② 在 N_2O-乙炔火焰中。

③ 没有分辨的发射及荧光光谱线。

表 9-35 锗的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
265.118	265.158	$N_2O/O_2/Ac$	EDL	15000	270	265.1	265.1	$Ar-S/N_2O/Ac$	EDL	100	271
265.118	265.158	$S/N_2O/Ac$	HIHCL	2000	9	NS	NS	ICP	HCL	200	13
303.906	303.906	$S/N_2O/Ac$	HIHCL	17000	9	NS	NS	ICP	HCL	50	17
265.118	265.158	Ar/H_2	EDL	10000	51	NS	NS	Hy	NS	5	272
265.1	265.1	$N-S/N_2O/Ac$	EDL	1100	271						

① 见本章末“参考文献”。

表 9-36　氢的原子荧光测定参数

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	文献①
243 656	656	Air/H_2	PDL	279
121.6	121.6	VC	MIP	214
291.7	486.1	O_2/Ac	PDL	280

① 见本章末"参考文献"。

表 9-37　铪的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
368.224	377.764	N_2O/Ac	PDL	105	278
263.9	263.9	ICP	ICP	30	22
263.87	303.12	ICP	PDL	16	276

① 见本章末"参考文献"。

表 9-38　汞的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
253.7 407.8	185	VC	PDL	--	333
253.7	253.7	ICP	PDL	5	34
NS	NS	S/Air/H_2	HCL	20000	41
NS	NS	Pt loop	HCL	500	41
—	ND SB	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	15pg	75
	ND SB	VC	EDL	0.12(8pg)	334
253.7	253.7	VC	EDL	0.0016	335
253.65	253.65	VC	EDL	0.0001(0.05ng)	336
253.9	253.9	VC	HgDL	40	337
253.9	253.9	VC	EDL	0.02(0.01ng)	338
253.9	253.9	VC	EDL	0.04	339
253.9	253.9	VC	EDL	5pg	340
253.652	253.652	Air/H_2	MVL	100	142
253.652	253.652	O_2/H_2	MVL	100	142
253.652	253.652	O_2/H_2	MVL	100	142
253.652	253.652	Air/NG	MVL	7000	142
253.652	253.652	N-S/Air/H_2	EDL	100	7
253.652	253.652	Air/Ac	HCL	400000	48
253.652	253.652	S/Air/Ac	HCL	50000	48
253.652	253.652	Air/Ac	MVL	2000	48
253.652	253.652	S/Air/Ac	MVL	500	48
253.652	253.652	Air/Ac	HCL	120000	49
253.652	253.652	S/Air/Ac	HCL	60000	49
—	253.652	Air/H_2	Xe 150	100000	50
253.652	253.652	O_2/H_2	PHCL	2000	165
253.7	253.7	ICP	HgDL	0.3	166
253.7	253.7	ICP	HgDL	45	166
253.7	253.7	VC	HgDL	0.04	166
NS	ND	VC	HCL	0.0036	341
253.7	253.7	Pt loop	EDL	10ng	170
253.7	253.7	Pt loop	EDL	10(0.02ng)	112
253.7	253.7	Air/Town gas	MVL	0.25	342
253.7	253.7	Ar/Air/H_2	EDL	2500	172
253.7	253.7	Air/H_2	EDL	30	173
253.7	253.7	Air/Propane	HgDL	2	343
253.7	ND SB	Air/H_2	MVL	1000	175
253.7	253.7	O_2/H_2	EDL	400	177
253.7	253.7	O_2/H_2	MVL	5000	178
253.7	253.7	O_2/Ac	MVL	1000	178
253.7	253.7	O_2/H_2	HgDL	2	344
NS	ND	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.1	80
253.7	ND	Air/Ac	EDL	1600	182
NS	NS	ICP	HCL	5	17
—	253.7	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	28000	53
253.7	253.7	Ar-S/Air/Ac	EDL	500	53

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
253.7	253.7	Air/H_2	EDL	10	55
253.7	253.7	GF	EDL	14(7pg)	188
253.7	253.7	Air/H_2	EDL	20	189
253.6	253.6	ICP	EDL	10	190
253.6	253.6	VC	HgDL	0.06(3ng)	345
—	—	冷蒸汽	—	—	346
NS	NS	Hy	EDL	—	87
NS	—	Hy	—	15pg	347
NS	NS	Hy+Ar	NS	0.000001	348
NS	NS	Hy+Ar	NS	0.15ng	349
NS	253.65	Hy+Ar	NS	25pg	350
NS	NS	冷蒸汽	—	—	351
NS	253.7	Hy+Ar	—	0.18	352
NS	NS	MIP	NS	3	353
253.6	253.6	Hy+Ar	NS	0.0009	354
—	—	Hy+Ar	—	—	355
NS	NS	冷蒸汽	—	—	356
—	—	冷蒸汽	—	—	357
NS	ND	Hy	NS	0.01ng	358
NS	ND	Hy	HgDL	0.01	359
NS	NS	Hy	BDHCL	0.05ng	93
NS	ND	FI-Hy	HCL	0.02(0.01ng)	62
NS	NS	Hy	NS	0.2	360
NS	ND	Hy	NS	2.5	361
NS	NS	Hy	NS	0.006	362
NS	ND	Hy	EDL	—	363
NS	ND	FI Hy	—	--	364
NS	253.7	HG+He	NS	<2	365
NS	NS	冷蒸汽	NS	0.001	366
NS	ND	冷蒸汽	NS	0.000006	367
				0.00007	368
				0.00005	368
NS	253.7	—	—	0.23	369
253.7	546.2	GF-ETA	LE	0.0014	370
NS	NS	冷蒸汽	—	0.001	371
NS	254	NS	NS	0.000[illegible]	372
		冷蒸汽	—	—	373
		冷蒸汽	--	5～7ng	374
					375
				—	376
NS	NS	冷蒸汽	..	0.002	377
NS	253.7	NS	NS	40ng	378
NS	NS	NS	NS	100	379
				0.025	380
				2	381

① 见本章末"参考文献"。

表 9-39 钬的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	注 释	文献①
410.384	405.393	N_2O/Ac	PDL	150		210
410.384	422.704	N_2O/Ac	PDL	150		210
345.3	345.3	ICP	ICP	10	离子	22

① 见本章末"参考文献"。

表 9-40 碘的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	注 释	文献①
206.2	206.2	Air/Ac	EDL	1600000		282
—	ND	MVL	XeFL	—	<10^{10}个原子/cm^3	283

① 见本章末"参考文献"。

表 9-41 铟的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
410	451	GF	PDL	0.002(20fg)	228	410.176	410.176	Air/H_2	PDL	10	10
410.2	410.2	ICP	PDL	300	100	410	451	GF	PDL	0.004 (80fg)	234
303.9	325.6	GF	PDL	0.014(0.14pg)	2	410.4	410.4	Air/H_2	PDL	10	11
303.936	325.856	GF	PDL	0.002(0.1pg)	115	451.1	410.5	Air/H_2	MVL	15	267
451.1	451.1	Air/Ac	EDL	200	35	—	410.2	Air/Ac	Xe 500	20000	171
—	303.9	CGF	Xe 150	10	116	—	451.1	Air/Ac	Xe 500	15000	171
451.1	451.1	ICP	HCL	10	43	—	410.2	N-S/Air/Ac	Xe 300	3	180
451.131	451.131	Air/H_2	MVL	—	266	—	410.2	GF+MNP	Xe 300	40ng	14
410.176	410.176	Ar/Air/H_2	EDL	100	232	NS	NS	ICP	HCL	2	17
451.131	451.131	N_2O/H_2	EDL	1000	7	303.9	325.6	GF	PDL	0.01 (500mg)	21
451.131	451.131	Air/Ac	HCL	8000	48	303.94	325.61	GDSC	PDL	11ng	281
303.936	303.936	Air/Ac	HCL	50000	48	—	451.13	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	50	185
451.131	451.131	S/Air/Ac	HCL	4000	48	—	451.13	N-S/Air/Ac	Xe 300	30	27
303.936	303.936	A/Air/Ac	HCL	5000	48	410.4	451.1	Air/Ac	PDL	0.2	25
451.131	451.131	Air/Ac	MVL	900	48	—	451.1	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	10	187
303.936	303.936	Air/Ac	MVL	7000	48	—	451.1	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	25	28
451.131	451.131	S/Air/Ac	MVL	400	48	303.9	303.9	Air/H_2	EDL	50	189
303.936	303.936	S/Air/Ac	MVL	2000	48	NS	NS	ETA	LE	0.02pg	239
410.176	410.176	Ar/Air/H_2	EDL	100	51	NS	NS	GT-ETA	LE	2fg	268
410.176	451.131	Air/H_2	PDL	2	10	NS	NS	GT-ETA	LE	1fg	269

① 见章末"参考文献"。

表 9-42 铱的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
295.1	322.1	GF	PDL	0.2(6pg)	226	284.97	292.68	ICP	PDL	58	276
284.9	357.4	GF	PDL	47.5(0.475ng)	2	295.1	322.1	GF	PDL	16(0.48ng)	284
254.397	254.397	Air/Ac	HCL	600000	48	285.0	357.4	PHCD	CWDL	2pg	285
254.397	254.397	S/Air/Ac	HCL	170000	48	285.0	357.4	GDSC	PHCL	6(0.02ng)	

① 见本章末"参考文献"。

表 9-43 钾的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
766.5	766.5	ICP	HCL	3.5	183	—	—	—	—	—	396
NS	NS	ICP	HCL	0.6	17	NS	NS	ICP	HCL	0.92ng	327
—	404.41	N-S/Air/Ac	Xe 150	2000	106	766.5	766.5	ICP	HCL	2	207
766.5	766.5	ICP	ICP	100	22						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-44　镧的原子荧光测定参数及检出限[263,211]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$
457.488 618.809	421.756	ICP	PDL	240
403.17	379.089	ICP	PDL	170

表 9-45　镥的原子荧光测定参数及检出限[210,263,211]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$
465.802	513.509	N_2O/Ac	PDL	3000
646.312 517.394	290.030	ICP	PDL	1800
302.05	296.33	ICP	PDL	85

表 9-46　锂的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
610.3	610.3	Air/Ac	CWDL	500	19	670.8	670.8	Air/Ac	PDL	0.5	29
610.3	610.3	ICP	CWDL	400	20	—	670.8	ICP	ICP	7	31
670.8	670.8	Laser plume	FLDL	—	326	—	670.8	ICP	ICP	5	32
670.8	670.8	ICP	HCL	0.3	183	NS	NS	ICP	HCL	1.8ng	327
670.8	670.8	ICP	ICP	7	15	NS	NS	GF	LE	0.001	
670.8	670.8	GF	PDL	80(0.4ng)	21						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-47　镁的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
285.2	285.2	MIP	HCL	20	1	285.2	285.2	ICP	HCL	1.7	183
NS	285.2	ICP	HCL	0.4	5	285.2	285.2	Air/Ac	HCL	4	184
285.213	285.213	Air/Prop	HIHCL	1	329		285.2	Ar-S/Air/Ac	XeFL	4	16
285.213	285.213	N_2O/Ac	HIHCL	5	329		285.2	Ar-S/Air/Ac	Xe 150	0.3	16
	285.213	Ar/Air/H_2	Xe 450	4	203	285.2	285.2	ICP	HCL	0.4	19
	285.213	Air/H_2	Xe 450	10	330	279.1	279.1	ICP	ICP	0.2	22
285.213	285.213	O_2/H_2	EDL	10	233		285.21	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	0.3	185
	285.213	Ar/O_2/H_2	Xe 900	200	291	285.2	285.2	N-S/Air/Ac	ICP	0.09	26
285.213	285.213	Air/Ac	HIHCL	0.6	48	285.2	285.2	Air/Ac	ICP	4	205
285.213	285.213	S/Air/Ac	HCL	0.8	48		285.21	N-S/Air/Ac	Xe 300	0.9	27
285.213	285.213	S/Air/Ac	HIHCL	0.15	48	285.2	285.2	Air/Ac	PDL	0.2	29
	285.213	Ar/Air/H_2	Xe 150	40	50		285.2	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	0.4	187
285.213	285.213	Ar/Air/H_2	EDL	8	51		285.2	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	0.1	28
285.2	285.2	W loop	EDL	2000	112		285.2	GF	Xe 150	0.2(pg)	186
	285.2	Air/Ac	Xe 500	3000	171	285.2	285.2	CGF	EDL	50	54
	285.2	Ar/Air/H_2	Xe 150	50	223	285.2	285.2	Air/H_2	EDL	0.05	55
	285.2	Air/H_2	Xe 450	4	204		285.2	Air/Ac	Xe 900	30	30
	285.2	Air/H_2	Xe 150	100	258	NS	NS	GF	HIHCL	0.00003	83
	285.2	N-S/Air/Ac	Xe 300	1	180		285.2	N-S/Air/Ac	Xe 300	4	191
285.2	285.2	ICP	HCL	0.5	13	285.2	285.2	ICP	HCL	0.9	207
	285.2	GF+MNP	Xe 300	0.5ng	14	NS	NS	ICP	HCL		199
285.2	285.2	N-S/Air/Ac	DCP	1	81						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-48　锰的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃　迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①,②
279.48	0～4.433	$a^6S_{5/2}—y^6P^0_{7/2}$	13.9	100
279.83	0～4.428	$a^6S_{5/2}—y^6P^0_{5/2}$	12.4	73.6
280.11	0～4.423	$a^6S_{5/2}—y^6P^0_{3/2}$	11.0	47.7
403.08	0～3.075	$a^6S_{5/2}—z^6P^0_{7/2}$	10.0	22.1
403.31	0～3.073	$a^6S_{5/2}—z^6P^0_{5/2}$	84.8	19.5
403.45	0～3.072	$a^6S_{5/2}—z^6P^0_{3/2}$	61.5	14.6

① HCL 光源。

② 在空气-乙炔火焰中。

表 9-49 锰的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
285.2	285.2	Air/Ac	PDL	0.3	295
279.5	279.5	MIP	HCL	500	1
285.2	285.2	Air/Ac	PDL	0.002	201
279.6 279.8	279.1	ICP	PDL	0.05	101
279	279	GF	PDL	0.0001(10pg)	228
285.2	285.2	Air/H_2	HgDL	500	134
285.2	285.2	Air/Ac	HCL	5	248
285.2	285.2	S/Air/Ac	HCL	4	202
285.2	285.2	S/Air/Ac	HCL	8	251
	285.2	CGF	Xe 150	3	117
	285.2	S/Air/Ac	Xe 150	2.5	253
285.2	285.2	Air/H_2	HCL	2	143
	285.2	Air/Ac	Xe 2500	5	229
285.2	285.2	ICP	HCL	0.3	43
285.2	285.2	S/Air/Ac	HCL	20	230
285.2	285.2	S/Air/Ac	ICP	4	44
285.2	285.2	S/Air/Ac	EDL	0.7	44
	285.2	S/Air/Ac	Xe 300	0.6	219
	285.2	He/O_2/Ac	Xe 300	30	148
	285.21	N_2O/Ac	Xe 300	200	153
	285.21	Air/Ac	Xe 300	20	153
	285.2	He/O_2/Ac	Xe 300	30	156
	285.2	Air/Ac	Xe 300	1000	156
	285.2	Air/Ac	Xe 300	2	157
279.5	279.5	ICP	HCL	4.5	166
279.5	279.5	ICP	HCL	3.0	166
279.5	403	GF	PDL	0.03(0.6pg)	234
279.5	279.5	GF	PDL	0.0045(90fg)	234
403.1	403.1	Air/H_2	PDL	300	11
	279.8	Air/Ac	Xe 500	2500	171
	279.5	Air/H_2	Xe 150	500	258
	279.5	N-S/Air/Ac	Xe 300	8	180
	279.5	GF+MNP	Xe 300	3ng	14
279.5	279.5	N-S/Air/Ac	DCP	2	81
279.5	279.5	Air/Ac	HCL	250	184
	279.9	Ar-S/Air/Ac	XeFL	30	16
	279.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 150	4	16
	279.48	N-S/Air/Ac	Xe 150?	28	107
279.8	280.1	GF	PDL	0.2(10pg)	21
	279.5	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	70	236
279.83	279.83	ICP	ICP	150	23
257.61	257.61	ICP	ICP	9	23
403.1	403.1	GF	PDL	4(20pg)	331
	279.48	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	3	185
NS	NS	ICP	ICP	8	24
NS	NS	ICP	ICP	0.9	24
279.5	279.5	N-S/Air/Ac	ICP	2	25
—	279.48	N-S/Air/Ac	Xe 300	4	27
279.5	279.5	Air/Ac	PDL	0.4	29
—	279.5	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	3	187
—	279.5	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	2	28
—	279.5	GF	Xe 150	3(1.5pg)	186
—	279.8	Air/Ac	Xe 900	90	30
NS	ND SB	GDSC	HIHCL	70000	225
279.5	279.5	W spiral	EDL	0.3pg	123
NS	NS	ETA	LE	0.1pg	239
NS	NS	ETA	LE		332
NS	NS	ICP	HCL	—	197

① 见本章末"参考文献"。

表 9-50 钼的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度		相对荧光强度	
			A①	B②	A①,③	B②,④
313.26	0～3.957	$a^7S_3—y^7P_4^0$	49	100	96	100
315.82	0～3.925	$a^7S_3—z^7D_3^0$	18	26	10	13
317.03	0～3.909	$a^7S_3—y^7P_3^0$	31	63	39	59
319.40	0～3.881	$a^7S_3—y^7P_2^0$	25	58	32	46
379.83	0～3.263	$a^7S_3—z^7P_4^0$	92	80	100	35
386.41	0～3.208	$a^7S_3—z^7P_3^0$	100	67	83	25
390.30	0～3.176	$a^7S_3—z^7P_2^0$	67	54	46	7

① 用高强度空心阴极灯激发。

② 用 EDL 激发。

③ 在空气-乙炔火焰中。

④ 在 N_2O-乙炔火焰中。

表 9-51 钼的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
585.8	345.6	N_2O/Ac	CWDL	14000	98
313.3	313.3	ICP	HCL	200	43
NS	NS	ICP	HCL	20	4
313.259	317.035	ICP	PDL	5	6
313.259	313.259	S/N_2O/Ac	EDL	460	8
390.296	390.296	N_2O/Ac	PDL	300	10
379.825	379.825	N_2O/Ac	PDL	10000	10
588.8	588.8	GF	FLDL	18000(180ng)	104
313.5	313.5	ICP	HCL	200	13
NS	NS	ICP	HCL	8	17
313.3	317.0	GF	PDL	0.1	18
313.3	313.3	ICP	HCL	5000	20

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
313.3	ND	ICP	HCL	1000	20	313.3	313.3	N-S/N_2O/Ac	ICP	400	26
313.26	317.04	ICP	PDL	27	276		313.26	N-S/N_2O/Ac	Xe 300	1000	27
386.41	386.41	ICP	ICP	1500	23	379.8	379.8	N_2O/Ac	PDL	12	29
202.03	202.03	ICP	ICP	12000	23		313.3	Ar-S/N_2O/Ac	Xe 500	100	28
NS	NS	ICP	ICP	100	24		313.3	N_2O/Ac	Xe 900	1000	30
386.411	386.411	ICP	PDL	3000	107	NS	NS	ICP	ICP	15	382
	313.3	GF+Air/Ac	Xe 300	400(0.4ng)	25	NS	NS	ICP	ICP	15	383

① 见本章末"参考文献"。

表 9-52 氮的原子荧光测定参数[389]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	注释
211	869	Plasma	PDL	$<10^{10}$个原子/cm^3

表 9-53 钠的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
589.0	589.0	VC	HCL	33	432	589.0	589.0	VC	CWDL	—	440
589.0	589.0	VC	MVP	0.5	432	589.0	589.0	GF	FLDL	0.0028(28fg)	104
589.0	589.0	VC	PDL	0.003	432	589.0	589.0	—	PDL	0.003	267
589.0	589.0	VC	PDL	0.000007	433	589.0	589.0	ICP	HCL	2	183
589.0	589.0	VC	CWDL	—	434	589.0	589.0	ICP	ICP	0.2	15
589.0	589.0	H/O_2/Ar	CWDL	2	92	NS	NS	ICP	HCL	0.2	17
589.0	589.0	Air/Ac	PDL	—	435	589.0	589.0	ICP	HCL	6	19
589.0	589.0	Air/Prop	PDL	0.2	436		589.59	N-S/Air/Ac	Xe 150?	7	106
589.6	589.6	GF	PDL	0.02(0.6pg)	226	589.0	589.0	ICP	ICP	1	22
589.0	589.0	MIP	HCL	10	1	588.99	588.99	ICP	ICP	100	23
582.0	582.0	VC	PDL	—	437	589.6	589.6	GF	PDL	0.6(3pg)	331
589.6	589.6	Air/Ac	CWDL	0.1	98		589.59	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	60	185
589.0	589.0	ICP	CWDL	0.1	99		589.59	N-S/Air/Ac	Xe 300	8	27
589.6	589.6	Air/Ac	CWDL	—	438	589.0	589.0	Air/Ac	PDL	0.1	29
589.0	589.0	Air/Ac	PDL	0.0028(55fg)	102		589.0	ICP	ICP	0.2	31
589	589	DCP	PDL	10	103		589.0	ICP	ICP	0.1	32
589.0	589.0	VC	MVL	—	439	NS	NS	ICP	HCL	0.34ng	327
589.0	589.0	ICP	HCL	0.5	43						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-54 铌的原子荧光测定参数及检出限[278]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
407.973	405.894	N_2O/Ac	PDL	1500
407.973	415.258	N_2O/Ac	PDL	1500
292.78	269.71	ICP	PDL	11(283ng)

表 9-55 钕的原子荧光测定参数及检出限[98,210,211]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
562.0	562.0	N_2O/Ac	CWDL	2000
463.424	489.693	N_2O/Ac	PDL	2000
430.358	424.738	N_2O/Ac	PDL	40000
406.[illegible]1	428.45	ICP	PDL	470

表 9-56 镍的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①②	λ/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①②
229.00	0～5.412	$a^3F_4—x^3F_4^o$	5	5	305.08	0.025～4.088	$a^3D_3—y^3F_4^o$	74	12
231.10	0～5.363	$a^3F_4—w^3F_4^o$	19	52	310.16③	0.109～4.105	$a^1D_2—y^3F_3^o$	57③	9③
231.23	0.165～5.525	$a^3F_3—w^3F_3^o$	8	12	310.19③	0.423～4.418	$a^1D_2—y^1F_3^o$		
231.40	0.275～5.631	$a^3F_2—w^3F_2^o$	13	7	313.41	0.212～4.167	$a^3D_1—y^3F_2^o$	25	7
232.00	0～5.342	$a^3F_4—y^3G_5^o$	32	100	341.48	0.025～3.655	$a^3D_3—z^3F_4^o$	95	13
232.58	0.165～5.494	$a^3F_3—y^3G_4^o$	12	6	346.17	0.025～3.606	$a^3D_3—z^5F_4^o$	99	4
234.55	0～5.284	$a^3F_4—x^3D_3^o$	14	13	351.51	0.109～3.635	$a^3D_2—z^3F_3^o$	58	6
300.25	0.025～4.153	$a^1D_2—y^3D_2^o$	59	13④	352.45	0.025～3.542	$a^3D_3—z^3P_2^o$	100	20
300.36	0.109～4.235	$a^3D_2—y^3D_2^o$	22						

① 用高强度空心阴极灯激发。② 在空气-H 火焰中。③ 在未分辨的发射及荧光光谱线。④ 谱线在荧光光谱中未分辨。

表 9-57　镍的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
305.1	305.1	Air/Ac	PDL	100	295
232.0	232.0	Air/Ac	HgDL	3000	134
322.165	361.939	GF	PDL	0.02(1pg)	115
232.0	232.0	Air/Ac	EDL	20	35
300.249	342	Ar-S/Air/Ac	PDL	26	384
232.0	232.0	S/Air/Ac	HCL	70	251
	232.0	CGF	Xe 150	30	117
232.0	232.0	Air/Ac	HCL	50	143
341.5	349.3 341.5	Air/Ac	Xe 2500	1000	229
232.0	232.0	ICP	HCL	25	43
232.0	232.0	S/Air/Ac	ICP	50	44
232.0	232.0	S/Air/Ac	EDL	50	44
NS	NS	ICP	HCL	0.8	4
	341.48	N_2O/Ac	Xe 300	400	153
	341.48	Air/Ac	Xe 300	800	153
NS	NS	GDSP	BHCL	10000	119
232.0	232.0	ICP	HCL	3	158
NS	231.1 231.2 232.5	ICP	HCL	70	5
232.003	232.003	Air/H_2	HIHCL	5	232
313.411	313.411	Air/H_2	HIHCL	5	232
232.003	232.003	Ar/O_2/H_2	HIHCL	3	232
232.003	232.003	Air/Ac	HIHCL	30	232
	232.003	S/Air/H_2	Xe 900	1000	203
232.003	232.003	N_2-S/Air/H_2	EDL	6	7
232.003	232.003	Air/Ac	HCL	600	48
232.003	232.003	S/Air/H_2	HCL	300	48
232.003	232.003	S/Air/H_2	HCL	500	49
232.003	232.003	Air/Ac	HCL	1000	49
	232.003	Air/H_2	Xe 150	10000	50
361.046	352.454	Air/Ac	PDL	50	10
232.003	232.003	Air/H_2	EDL	40	51
232.003	232.003	Air/H_2	PHCL	1000	165

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
589.3	589.3	GF	FLDL	100000(1000ng)	104
232.0	232.0	N-S/Air/Ac	HIHCL	7	385
	232.0	Air/Ac	Xe 500	8000	171
	341.5	Air/Ac	Xe 500	5000	171
	352.24	Ar/Air/H_2	Xe 150	500	223
232.0	232.0	Air/H_2	HIHCL	100	386
232.0	232.0	Air/H_2	HIHCL	500	12
	232.0	N-S/Air/Ac	Xe 300	500	180
	352.5	N-S/Air/Ac	Xe 300	50	180
	232.0	GF+MNP	Xe 300	30ng	14
232.0	232.0	ICP	ICP	21	15
NS	NS	ICP	HCL	0.2	17
231.1	231.1	ICP	HCL	70	19
300.25	340	N-S/Air/Ac	PDL	0.5	387
	352.5	N-S/Air/Ac	Xe 300	200	236
232.003	232.003	ICP	ICP	380	23
231.60	231.60	ICP	ICP	100	23
	232.00	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	40	185
	232.00	N-S/Air/Ac	Xe 300	80	27
361.0	352.4	Air/Ac	PDL	2	29
	232.0	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	20	187
	232.0	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	25	28
	232.0	GF	Xe 150	100(0.05ng)	186
232.0	232.0	Air/H_2	EDL	70	55
	232.0	Air/Ac	Xe 900	4000	30
NS	NDSB	GDSC	HIHCL	20000	225
	231.1	ICP	ICP	21	31
232.0	232.0	Ar-S/Air/Ac	EDL	20	237
NS	NS	GY	NS	3pg	246
NS	NS	NS	GWDL	3fg	293
NS	NS	MIP	XeFL	0.05ng	241
NS	301.9	电热石墨坩埚	激光	<3～10ng	242
NS	231.398	GF	LE	15fg	388

① 见本章末“参考文献”。

表 9-58　氧的原子荧光测定参数

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	注　释	文献①
226	844.6	Plasma	PDL	<10^{13}个原子/cm^3	391
130	130	VC	PDL	<10^{10}个原子/cm^3	392
226	845	Plasma	PDL	<10^{10}个原子/cm^3	289

① 见本章末“参考文献”。

表 9-59　锇的原子荧光测定参数及检出限[390,278]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
?	?	VC	?	5pg
442.047	426.085	N_2O/A	PDL	150000

表 9-60　磷的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
213.6	213.6	ICP	PDL	15	34	213.68	253.4	ETA	LE	8pg	395
178.3	178.3	ICP	HCL	20000	13	213.6	253.6	GT-ETA	LE	7pg	244
253.4	253.4	ICP	ICP	80	22						

① 见本章末“参考文献”。

表 9-61 铅的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃　迁	相对光源发射强度		相对荧光强度①	
217.00	0～5.712	$^3P_0—^3D_1^0$	0.4②	15③	3.2②	16③
261.37 261.42	0.969～5.712 0.969～5.711	$^3P_1—^3D_1^0$ $^3P_1—^3D_2^0$	18.8	49	4.0	13
280.20	1.320～5.744	$^3P_2—^3F_3^0$	17.2	55	2.6	8
282.32	1.320～5.711	$^3P_2—^3D_2^0$	32.8	7	1.4	—
283.31	0～4.375	$^3P_0—^3P_1^0$	34.3	79	52.5	68
287.33	1.320～5.612	$^3P_2—^3F_3^0$	4.4	26	1.3	—
363.96	0.969～4.375	$^3P_1—^3P_1^0$	14.7	47	16.1	33
368.35	0.969～4.334	$^3P_1—^3P_0^0$	70.5	65	7.6	25
401.96	2.660～5.744	$^1D_2—^3F_3^0$	4.8	—	0.7	—
405.78	1.320～4.375	$^3P_2—^3P_1^0$	100	100	100	100
722.90	2.660～4.375	$^1D_2—^3P_1^0$	77.1	—	65.2	—

① 在 Ar-O-H 火焰中。

② 用 EDL 激发。

③ 用高强度空心阴极灯激发。

表 9-62 铅的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
283.3	405.6	Air/Ac	PDL	30	295
283.3	405.8	GF	PDL	0.04(0.2pg)	296
283.3	405.8	GF	PDL	0.3(1.5pg)	296
283.3	405.8	GF	PDL	1(5pg)	296
283	405	GF	PDL	0.0005	297
283	405	VC	PDL	—	297
283.3	405.7	GF	PDL	0.000025(1.5fg)	226
283.3	405.8	GF	PDL	0.0025(75fg)	287
283.3	405.8	Air/Ac	PDL	0.2	201
283.3	405.7	Air/Ac	PDL	0.4	298
283.3	405.8	GF	PDL	0.068(68fg)	299
283	405	GF	PDL	0.001(10fg)	228
	ND SB	GF	EDL	0.02	133
283.307	405.782	GF	PDL	0.0001(5fg)	115
405.8	405.8	Air/Ac	EDL	10	35
NS	NS	S/Air/H_2	HCL	20000	139
NS	NS	Pt loop	HCL	50000	139
	283.3	CGF	Xe 150	10	117
283	283	Air/H_2	HCL	50	143
		N_2-S/Air/Ac	BHCL	10	40
	ND	N_2-S/Air/Ac	EDL	50	40
283.3	283.3	Air/Ac	EDL	0.3ng	300
283.3	283.3	GF	EDL	0.27ng	300
283.3	283.3	Quartz F	EDL	0.1ng	300
	ND	GF+N_2-S/Air/Ac	EDL	5ng	144
	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.06	301
	ND SB	GF	HFDL	30pg	145
283.3	405.7	GDSC	PDL	10	302
283.3	405.7	GDSC	PDL	4(20pg)	302
283.3	283.3	ICP	HCL	25	43
405.7	405.7	S/Air/Ac	ICP	40	44
405.7	405.7	S/Air/Ac	EDL	30	44
	283.3	S/Air/Ac	Xe 300	200	219
	405.7	S/Air/Ac	Xe 300	300	219
283.3	283.3	N_2/Air/Ac	EDL	6	303
NS	NS	ICP	EDL	20	4
283.3	405.8	Ar/O_2/H_2	HCL	1.2	304

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
	405.78	N_2O/Ac	Xe 300	1100	153
	405.78	Air/Ac	Xe 300	1000	153
NS	NS	GDSC	BHCL	20000	119
364.0	364.0	ICP	HCL	50	158
283.3	283.3	ICP	HCL	34	159
283.3	405.8	Ar/Air/Ac	PDL	0.02	305
283.3	405.8	GF	PDL	0.0006(6fg)	305
283.306	405.783	GF	PDL	0.0003(3fg)	306
283.306 600.193	261.418	GF	PDL	0.02(2pg)	306
283.306 600.193	239.379	GF	PDL	0.013(13pg)	306
283.306 600.193	216.999	GF	PDL	0.027(27pg)	306
283.307	405.782	ICP	PDL	1	6
283.306	283.306	N_2/Air/H_2	EDL	60	7
405.783	405.783	Air/H_2	HIHCL	20	254
	405.783	Ar/O_2/H_2	Xe 900	500	291
	405.783	Ar/Air/H_2	Xe 900	200	291
	283.306	Air/Prop	Xe 150	20000	163
405.783	405.783	Ar/Air/H_2	EDL	500	51
405.783	405.783	Air/H_2	HIHCL	100	307
283.306	283.306	Air/H_2	HIHCL	120	307
268.347	268.347	Air/H_2	HIHCL	300	307
280.200	280.200	Air/H_2	HIHCL	800	307
363.958	363.958	Air/H_2	HIHCL	150	307
261.365	261.418	Air/H_2	HIHCL	450	307
216.999	216.999	Air/H_2	HIHCL	200	307
405.783	405.783	Ar/O_2/H_2	HIHCL	20	307
283.306	283.306	Ar/O_2/H_2	HIHCL	50	307
363.958	363.958	Ar/O_2/H_2	HIHCL	50	307
368.347	368.347	Ar/O_2/H_2	HIHCL	70	307
261.365	261.418	Ar/O_2/H_2	HIHCL	150	307
216.999	216.999	Ar/O_2/H_2	HIHCL	60	307
405.783	405.783	S/Air/Ac	HIHCL	200	307
283.306	283.306	S/Air/Ac	HIHCL	150	307
363.958	363.958	S/Air/Ac	HIHCL	400	307
261.365	261.418	S/Air/Ac	HIHCL	300	307
216.999	216.999	S/Air/Ac	HIHCL	120	307

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
280.200	280.200	S/Air/Ac	HIHCL	1000	307	283.3	405.7	Air/Ac	PDL	13	29
405.783	405.783	Air/Ac	HIHCL	—	308		405.8	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	1100	53
405.783	405.783	Ar-S/O_2/H_2	EDL	10	308	405.8	405.8	Ar-S/Air/Ac	EDL	300	53
405.783	405.783	N_2O/Ac	HIHCL	—	308		405.8	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	30	187
405.783	405.783	Air/Ac	HCL	9000	308		405.8	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	50	28
283.306	283.306	Air/Ac	HCL	20000	48		283.3	GF	Xe 150	70(35pg)	186
283.306	283.306	S/Air/Ac	HCL	3000	48	283.3	283.3	CGF	EDL	5	54
405.783	405.783	S/Air/Ac	HCL	4000	48	405.7	405.7	Air/H_2	EDL	30	55
405.783	405.783	Air/Ac	HCL	2300	48		405.8	Air/Ac	Xe 900	5000	30
283.306	283.306	Air/Ac	HCL	6000	49	405.8	405.8	GF	EDL	30(15pg)	188
283.306	283.306	S/Air/Ac	HCL	3000	49	NS	NS	GF	HIHCL	0.003	83
405.783	405.783	S/Air/Ac	HCL	1000	49	283.3	405.78	GF	HIHCL	5(3pg)	83
	405.783	Ar/Air/H_2	Xe 150	20000	49		280.2	ICP	ICP	80	31
283	261.4	GF	PDL	—	50	283.31	363.96	ICP	ICP	284	31
600.2	—	—	—	—	309	283.31	368.35	ICP	ICP	1900	31
283	405	GF	PDL	0.0004 (0.000007ng)	234	283.1	405.78	ICP	ICP	282	31
						405.8	405.8	W spiral	EDL	6pg	123
283.306	405.783	GF	PDL	0.000005	167	NS	NS	ETA	LE	0.01pg	239
405.7	405.7	W loop	EDL	2000(4ng)	112	283.306	405.783	GT	LPDL	3fg	314
	405.8	Ar/Air/H_2	Xe 150	900	223	217.0	217.0	ICP	HCL	133	207
	405.8	Kerosene	Xe 450	60	256	NS	ND	Hy	EDL	0.53ng	315
	405.8	Kerosene	Xe 450	160	256	283.30	405.78	GT	LPDL	0.5fg	316
405.8	ND SB	GF	EDL	0.02ng	174	283.3	405.8	GC	Laser	0.00027	317
405.8	405.8	Air/H_2	HIHCL	1000	12	283.3	405.5	GDSC	PHCL	0.1(0.5pg)	286
	405.8	N-S/Air/Ac	Xe 300	150	180	NS	NS	ETA	LE	—	259
283.3	283.3	Air/H_2	EDL	2.5	310	283.3	405.8	GC	Laser	0.005	318
	405.8	GF+MNP	Xe 300	0.4ng	14	NS	NS	IS	LEHCL	2.3	319
283.3	283.3	N-S/Air/Ac	DCP	500	81	NS	NS	GF	Laser	—	320
283.3	ND	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.003	311	283.33	405.7	PHCD	CWDL	15fg	285
283.3	ND	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.06	311	208.3	405.7	PCGD	LE	2pg	321
NS	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.03ng	312	NS	NS	GF	LE	4fg	240
NS	NS	ICP	HCL	5	17	282.2	405.8	ETA	XeCl	—	196
NS	ND SB	Hy-N_2/Ar/Air/H_2	EDL	20ng	313	NS	ND	Hy	NS	—	61
	405.8	N-S/Air/Ac	Xe	300	52	NS	NS	GF	LE	0.0004	322
405.8	405.8	N-S/Air/Ac	EDL	200	52	566	406	GF/Ar/H_2	DL	0.001	323
283.3	405.8	GF	PDL	0.04(0.2pg)	21	NS	405.8	GC	XeCl	0.00018	129
	405.8	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	1000	236	NS	NS	GF	LE	0.0004	324
	405.78	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	200	185	283.3	405.8	GD	LE	30fg	325
405.783	405.783	ICP	PDL	6000	107	NS	NS	NS	CWDL	0.05fg	293
283.3	283.3	N-S/Air/Ac	ICP	800	26	NS	NS	W-S	EDL	1	194
	405.78	N-S/Air/Ac	Xe 300	200	27						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-63 钯的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度②	λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度②
244.79	0～5.063	$^{1}S_{0}-^{1}P_{1}^{o}$	9	10	343.54	1.453～5.063	$^{1}D_{2}-^{1}P_{1}^{o}$	12	7
247.64	0～5.005	$^{1}S_{0}-^{3}D_{1}^{o}$	8	5	344.14	1.453～5.055	$^{1}D_{2}-^{1}D_{2}^{o}$	19	4
276.31	0～4.486	$^{1}S_{0}-^{3}P_{1}^{o}$	7	2	346.08	0.814～4.395	$^{3}D_{3}-^{3}F_{3}^{o}$	36	13
324.27	0.814～4.636	$^{3}D_{3}-^{3}D_{3}^{o}$	49	32	348.12	1.251～4.812	$^{3}D_{1}-^{3}F_{2}^{o}$	33	5
325.16	1.251～5.063	$^{3}D_{1}-^{1}P_{1}^{o}$	6	4	348.98	1.453～5.005	$^{1}D_{2}-^{3}D_{1}^{o}$	6	2
325.88	1.251～5.055	$^{3}D_{1}-^{1}D_{2}^{o}$	9	3	351.69	0.961～4.486	$^{3}D_{2}-^{3}P_{1}^{o}$	40	17
330.21	1.251～5.005	$^{3}D_{1}-^{3}D_{1}^{o}$	12	7	355.31	1.453～4.946	$^{1}D_{2}-^{1}F_{3}^{o}$	49	8
337.30	0.961～4.636	$^{3}D_{2}-^{3}D_{3}^{o}$	18	13	360.96	0.961～4.395	$^{3}D_{2}-^{3}F_{3}^{o}$	61	40
340.46	0.814～4.454	$^{3}D_{3}-^{3}F_{4}^{o}$	100	100	363.47	0.814～4.224	$^{3}D_{3}-^{3}P_{2}^{o}$	90	98
342.12	0.961～4.584	$^{3}D_{2}-^{3}D_{2}^{o}$	43	19					

① 使用高强度空心阴极灯激发。

② 在 Ar-O-H 火焰中。

表 9-64 钯的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
340.4	340.4	Air/H_2	HgDL	10000	134	363.470	363.470	Air/Ac	HIHCL	180	394
	363.47	Ar/Air/Ac	ICP	—	393	360.955	360.955	Air/Ac	HIHCL	300	394
363.5	363.5	ICP	HCL	5	158	324.270	324.270	Air/Ac	HIHCL	400	394
340.458	340.458	Air/H_2	HCL	2000	254	342.124	342.124	Air/Ac	HIHCL	350	394
340.458	340.458	Ar/O_2/H_2	HIHCL	40	394	351.694	351.694	Air/Ac	HIHCL	500	394
363.470	363.470	Ar/O_2/H_2	HIHCL	50	394	244.791	244.791	Air/H_2	HIHCL	250	394
360.955	360.955	Ar/O_2/H_2	HIHCL	100	394	330.213	330.213	Air/H_2	HIHCL	700	394
324.270	324.270	Ar/O_2/H_2	HIHCL	200	394	340.458	340.458	S/Air/Ac	HIHCL	150	9
342.124	342.124	Ar/O_2/H_2	HIHCL	200	394	247.642	247.642	S/Air/Ac	HIHCL	5000	9
351.694	351.694	Ar/O_2/H_2	HIHCL	300	394	244.791	244.791	Air/Ac	HIHCL	4000	48
244.791	244.791	Ar/O_2/H_2	HIHCL	500	394	244.791	244.791	S/Air/Ac	HIHCL	2000	48
330.213	330.213	Ar/O_2/H_2	HIHCL	500	394	340.458	340.458	Air/Ac	HCL	3500	49
340.458	340.458	Air/H_2	HIHCL	60	394	340.458	340.458	S/Air/Ac	HCL	1000	49
363.470	363.470	Air/H_2	HIHCL	120	394	340.458	340.458	Air/H_2	PHCL	3000	165
360.955	360.955	Air/H_2	HIHCL	200	394	250.0	250.0	Air/H_2	HIHCL	500	12
324.270	324.270	Air/H_2	HIHCL	350	394	—	363.5	N-S/Air/Ac	Xe 300	500	180
342.124	342.124	Air/H_2	HIHCL	250	394	NS	NS	ICP	HCL	2	17
351.694	351.694	Air/H_2	HIHCL	450	394	324.27	340.46	ICP	PDL	6	276
244.791	244.791	Air/H_2	HIHCL	250	394		340.1	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	30	187
330.213	330.213	Air/H_2	HIHCL	500	394		340.1	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	100	28
340.458	340.458	Air/Ac	HIHCL	80	394						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-65 镨的原子荧光测定参数及检出限[210,211]

激发 λ_A/nm	荧光波长 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	注释
427.227	430.576	N_2O/Ac	PDL	1000	离子
406.13	405.65	ICP	PDL	240	离子

表 9-66 铂的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对的光源发射强度①,②	相对荧光强度①,②	λ/nm	能级/eV	跃迁	相对的光源发射强度①,②	相对荧光强度①,②
204.94	0~6.045	${}^3D_3-32^0_3$	3	9	265.09	0.102~4.778	${}^3F_4-z^5F^0_5$	60	2
206.75	0~5.994	${}^3D_3-30^0_4$	1	3	265.94	0~4.660	${}^3D_3-7^0_4$	76	100
208.46	0.102~6.045	${}^3F_4-27^0_3$	2	6	267.71	0~4.630	${}^3D_3-6^0_2$	7	3
210.33	0.102~5.994	${}^3F_4-30^0_4$	5	8	270.24	0.096~4.682	${}^3D_2-8^0_3$	31	30
212.86	0.096~5.919	${}^3D_2-29^0_1$	10	13	270.59	0.102~4.682	${}^3F_4-8^0_3$	20	22
214.42	0~5.780	${}^3D_3-27^0_3$	11	6	271.90	0.102~4.660	${}^3F_4-7^0_4$	17	18
217.47	?	? ?	16	38	273.40	0.096~4.630	${}^3D_2-6^0_2$	40	21
227.44	0.096~5.546	${}^3D_2-?$	12	3	283.03	0~4.379	${}^3D_3-4^0_3$	57	13
235.71	0.096~5.354	${}^3D_2-18^0_1$	8	3	289.39	0.096~4.379	${}^3D_2-4^0_3$	16	3
244.01	0~5.079	${}^3D_3-15^0_3$	24	6	292.98	0~4.230	${}^3D_3-3^0_3$	40	13
246.74	0~5.023	${}^3D_3-12^0_2$	17	4	299.80	0.096~4.230	${}^3D_2-3^0_3$	58	17
248.72	0~4.983	${}^3D_3-11^0_4$	43	7	304.26	0.102~4.176	${}^3F_4-2^0_5$	100	6
249.85	0.096~5.057	${}^3D_2-13^0_2$	16	3	306.47	0~4.044	${}^3D_3-1^0_2$	95	73
262.80	0.096~4.812	${}^3D_2-10^0_2$	30	16	340.81	0.102~3.739	${}^3F_4-z^5D^0_4$	63	3
264.69	0~4.683	${}^3D_2-8^0_3$	12	13					

① 使用高强度空心阴极灯激发。

② 屏蔽的空气-乙炔焰。

表 9-67 铂的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
293.0	299.7	GF	PDL	4(0.120ng)	226	214.4	214.4	ICP	ICP	30	22
265.9	265.9	ICP	HCL	75	158	265.94	271.90	ICP	PDL	4	276
265.945	265.945	Air/Ac	HCL	90000	49	—	265.94	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	1000	185
265.945	265.945	S/Air/Ac	HCL	60000	49	—	265.94	N-S/Air/Ac	Xe 300	100	27
265.945	265.945	S/Air/Ac	HIHCL	1000	9	—	266.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	700	28
265.9	270.2	GF	PDL	0.2(1pg)	21	293.0	299.7	GF	PDL	4(0.12ng)	284

① 见本章末"参考文献"。

表 9-68 钚的原子荧光测定参数及检出限[397]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
585	NS	ICP	PDL	50

表 9-69 铷的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
NS	NS	ICP	HCL	3	17	NS	794.67	NS	LE	0.2	399
287.50	366.34	ICP	PDL	34	276	NS	NS	ICP	HCL	2.7ng	327
794	780	GF	Laser	2.1pg	398	NS	NS	GF	LE	0.002	328
NS	780.023	NS	LE	0.2	399						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-70 铑的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
598.3	339.7	N_2O/AC	CWDL	300	98	369.236 370.91	350.252	Air/Ac	PDL	150	278
369.3	369.3	ICP	HCL	5	158						
343.489	343.489	Air/Ac	HCL	7000	48	NS	NS	ICP	HCL	0.3	17
343.489	343.489	S/Air/Ac	HCL	3000	48	—	343.49	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	80	185

① 见本章末"参考文献"。

表 9-71 钌的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
372.803	372.803	Air/Ac	HCL	15000	48	287.5	366.3	GF	PDL	0.1	235
372.803	372.803	S/Air/Ac	HCL	5000	48	287.5	366.3	GF	PDL	1	235
287.498	287.498	S/Air/Ac	HCL	1000000	48	NS	NS	ETA	LE	—	238
372.803	349.894	N_2O/Ac	PDL	500	400	287.5	366.3	GF	PDL	1	401

① 见本章末"参考文献"。

表 9-72 硫的原子荧光测定参数及检出限[441,442,13]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
	182.0	Air/H_2	Xe 300	—		180.7	ICP	HCL	1000
180.7	?	VC	Xe 300	1.5					

表 9-73 锑的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①,②
206.83	0～5.992	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{5/2}$	52	62
217.58	0～5.696	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{3/2}$	63	100
231.15	0～5.362	$^4S^0_{3/2}$—$^4P_{1/2}$	87	60
252.85	1.222～6.123	$^2D^0_{5/2}$—$^2P_{3/2}$	90	2
259.805③ 259.809③	1.055～5.826 1.222～5.992	$^2D^0_{3/2}$—$^2P_{1/2}$ $^2D^0_{5/2}$—$^4P^0_{5/2}$	100	19
267.06	1.055～5.696	$^2D^0_{3/2}$—$^4P_{3/2}$	8	4
277.00	1.222～5.696	$^2D^0_{5/2}$—$^4P_{3/2}$	18	3
287.79	1.055～5.362	$^2D^0_{3/2}$—$^4P_{1/2}$	24	8

① 使用高强度空心阴极灯激发。

② 在空气-H 火焰中。

③ 未分辨的发射及荧光谱线。

表 9-74 锑的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
231.1	206.8	ICP	PDL	20	34	217.581	217.581	S/Air/Ac	HCL	20000	48
	217.6	—	—	4		217.581	217.581	S/Air/Ac	HIHCL	600	48
	231.1	—	—	2		231.147	231.147	Air/Ac	HCL	—	49
217.6	217.6	Air/Ac	EDL	900	35	—	231.147	Air/H_2	Xe 150	10000	50
217.58	217.58	Air/Ac	HCL	150	36	231.147	231.147	Air/H_2	EDL	400	51
217.58	217.58	Air/H_2	HCL	100	36	NS	NS	ICP	HCL	10	17
217.58	217.58	Ar/O_2/H_2	HCL	50	36	—	217.6	N-S/Air/Ac	Xe	500	52
217.58	217.58	Air/H_2	HCL	30	36	217.6	217.6	N-S/Air/Ac	EDL	700	52
231.1	231.1	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.1(0.1ng)	37	—	217.6	Ar-S/Air/Ac	Xe300	25000	53
217.6	217.6	Ar/Air/H_2	EDL	0.1ng	38	217.5	217.6	Ar-S/Air/Ac	EDL	11000	53
217.6						231.1	231.1	CGF	EDL	10	54
231.1	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.5ng	39	231.1	231.1	Air/H_2	EDL	10	55
259.8						NS	NS	ICP	HCL	5ng	56
	ND	N_2-S/Air/Ac	BHCL	10	40	NS	ND	Hy	EDL	0.2ng	57
	ND	N_2-S/Air/Ac	EDL	50	40	NS	NS	Ar/Air/H_2	EDL	—	58
	ND SB	Ar/Air/H_2	EDL	25(0.5ng)	41	NS	ND	Hy	EDL	0.1	59
	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.1ng	42	NS	NS	Hy	EDL	0.68ng	60
231.1	231.1	ICP	HCL	40	43	NS	NS	Hy	EDL	0.5mg	61
231.1	231.1	S/Air/Ac	ICP	800	44	NS	ND	FI-Hy	HCL	0.4(0.8ng)	62
231.1	231.1	S/Air/Ac	EDL	50	44	NS	NS	NS	LE	(0.01pg)	63
	ND	HyVC	EDL	0.2ng	45	NS	NS	Hy	HCL	0.29	64
217.6	217.6	Ar/Air/H_2	EDL	0.02ng	46	NS	NS	Hy		0.19	65
231.147	231.147	Air/H_2	EDL	50	47	—	ND	Hy	EDL	22pg	66
217.581	217.581	N_2O/H_2	EDL	80	7	NS	NS	Hy	NS	5000	67
217.581	217.581	Air/Ac	HCL	50000	48	NS	NS	Hy	EDL	40	68
217.581	217.581	Air/Ac	HIHCL	1500	48						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-75 钪的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
570.8	568.7	N_2O/Ac	CWDL	50000	98	390.748	390.748	Ar/Air/H_2	EDL	10000	51
460.7	460.7	S/Air/Ac	ICP	20	44	391.181	402.040	N_2O/Ac	PDL	10	278
460.7	460.7	S/Air/Ac	EDL	20	44						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-76 硒的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①②	λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①②
196.09	0～6.323	$^3P_2$—$^3S_1$	8	67	206.28	0.314～6.323	$^3P_0$—$^3S_1^0$	100	52
203.99	0.247～6.323	$^3P_1$—$^3S_1^0$	42	100	207.48	0～5.974	$^3P_2$—$^5S_2^0$	21	2

① 使用 EDL 激发。

② 在空气-丙烷火焰中。

表 9-77 硒的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
196.0	196.0 204.0	ICP	PDL	10	33	240.0	240.0	Air/H_2	EDL	290	402
						240.0	240.0	N_2-S/Air/Ac	EDL	80	402
204.1	204.1	Air/Ac	EDL	10000	35	240.0	240.0	Ar/Air/H_2	EDL	66	402
196.1	196.1	Hy+Ar-S/Air/H_2	EDL	0.06(60pg)	37	—	ND SB	Ar/Air/H_2	EDL	15(0.3ng)	403
—	ND	N_2-S/Air/Ac	BHCL	150	40	196	206.3	ICP	HCL	150	43
—	ND	N_2-S/Air/Ac	EDL	650	40	196.0	196.0	S/Air/Ac	ICP	400	44
240.0	240.0	N_2-S/Air/Ac	EDL	91	402						

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]
196.0	196.0	S/Air/Ac	ICP	100	44	NS	NS	ICP	HCL	10	17
—	ND	HyVC	EDL	0.1ng	45	196.0	196.0	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	10	82
—	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.34	74		196.0	N-S/Air/Ac	Xe	1000	52
NS	NS	ICP	HCL	25	4		196.0	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	18000	53
196.0	196.0	N_2/Air/Ac	TGL	100	147	196.0	196.0	Ar-S/Air/Ac	EDL	500	53
196.0	196.0	N_2/Air/Ac	EDL	30	147		196.0	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	1000	187
	ND SB	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.02ng	75	NS	NS	Hy	EDL	—	409
	ND SB	Hy	EDL	0.02ng	404	NS	ND	Hy	EDL	—	410
196.03	196.03	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.02(0.4ng)	405		ND	Hy	—	18pg	411
203.985	203.985	Air/Prop	EDL	200	406	NS	ND	Hy	NS	27pg	412
207.479	207.479	Air/Prop	EDL	200	406	NS	NS	Hy	—	10pg	413
196.026	196.026	Ar/Air/H_2	EDL	400	51			Hy	—	—	414
196.026	196.026	O_2/H_2	EDL	800	51			Hy	—	1.5	415
196.026	196.026	N_2-S/Air/H_2	EDL	200	51	NS	ND	FI-Hy	HCL	0.07(35pg)	62
196.026	196.026	Air/H_2	EDL	40	7	NS	NS	Hy	BHCL	—	92
203.985	203.985	N_2-S/Air/H_2	EDL	200	7	352	497	Hy	NS	0.26	416
196.026	196.026	S/Air/Ac	HCL	50000	48	NS	ND	Hy	NS	—	417
203.985	203.985	Air/Ac	HCL	45000	49	NS	ND	Hy	HCL	4.5	418
196.026	196.026	Air/Ac	HCL	180000	49	NS	ND	Hy	NS	0.5	419
203.985	203.985	S/Air/Ac	HCL	45000	49	196	204	NS	FLDL	0.0015	94
196.026	196.026	S/Air/Ac	HCL	180000	49	NS	NS	HG	NS	0.100	420
	196.026	Ar/Air/H_2	Xe 150	1000000	50	NS	NS	Hy	EDL	1.10	421
196.026	196.026	Air/Ac	EDL	1000	407	NS	NS	Hy	NS	0.02	422
NS	ND	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.08	80	NS	NS	Hy	HCL	10	423
204.0	204.0	Hy+Quartz Furnace	EDL	1.4ng	408	NS	NS	Hy	NS	—	424
						NS	NS	Hy	EDL	—	425
NS	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.01ng	312	NS	NS	Hy	NS	0.04	426
	203.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 150	3000	16						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-78 硅的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度[①]	相对荧光强度[②]	λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度[①]	相对荧光强度[②]
250.69	0.010～4.953	$^3P_1-^3P_2^0$	89	45	251.92	0.010～4.929	$^3P_1-^3P_1^0$	64	27
251.43[③]	0～4.929	$^3P_0-^3P_1^0$	69	100	252.41	0.010～4.919	$^3P_1-^3P_0^0$	70	36
251.61[③]	0.028～4.953	$^3P_2-^3P_2^0$	100		252.85	0.028～4.929	$^3P_2-^3P_1^0$	73	48

① 使用 EDL 激发。

② 在 N_2O-乙炔火焰中。

③ 未分辨的荧光谱线。

表 9-79 硅的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献[①]
251.6	251.4 251.6	ICP	HCL	200	43	NS	NS	ICP	HCL	70	17
						251.4	251.4	ICP	ICP	7	22
NS	NS	GDSC	BHCL	40000	119	NS	ND SB	GDSC	HIHCL	4000000	225
288.158	251.433	ICP	PDL	1	6		250.9	ICP	ICP	120	31
251.611	251.611	N_2O/Ac	EDL	2000	400		250.9	ICP	ICP	80	32
251.611	251.611	S/N_2O/Ac	EDL	500	400	NS	251.432	平面磁控放电	激光	0.8-2	428
251.6	251.6	N-S/N_2O/Ac	EDL	700	427	NS	250	平面磁控放电	激光	0.43ng	429
251.6	251.6	ICP	HCL	300	13	NS	NS	IS	LEHCL	2.3	319
251.6	251.6	ICP	ICP	120	15						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-80 钐的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
366.136	373.912	N_2O/Ac	PDL	150	210	359.3	359.3	ICP	ICP	20	23
359.260	359.260	N_2O/Ac	PDL	150	210	363.43	363.43	ICP	ICP	30000	261
375.641	429.674	N_2O/Ac	PDL	600	22						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-81 锡的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃 迁	相对光源发射强度		相对荧光强度①	
			A②	B③	A②	B③
224.61	0~5.518	$^3P_0—^3D_1^o$	20	1.00	14	3.70
235.48	0.210~5.473	$^3P_1—^3D_2^o$	44	32.1	16	3.61
242.95	0.425~5.526	$^3P_2—^3D_3^o$	52	54.3	18	7.42
254.66	0~4.867	$^3P_0—^1P_1^o$	13	46.0	4	5.92
270.65	0.210~4.789	$^3P_1—^3P_2^o$	51	380	20	81.5
384.00	0.425~4.789	$^3P_2—^3P_2^o$	97	500	44	215
286.33	0~4.329	$^3P_0—^3P_1^o$	51	330	55	237
300.91	0.210~4.329	$^3P_1—^3P_1^o$	38	420	42	200
303.41	0.210~4.295	$^3P_1—^3P_0^o$	63	620	80	519
317.51	0.425~4.329	$^3P_2—^3P_1^o$	87	780	100	482
326.23	1.068~4.867	$^1D_2—^1P_1^o$	100	570	13	8.14
333.06	1.068~4.789	$^1D_2—^3P_2^o$	11	725	5	37.0
380.10	1.068~4.329	$^1D_2—^3P_1^o$	20	718	19	66.7

① 在 Ar-O-H 火焰中。

② 使用高强度空心阴极灯激发。

③ 使用 EDL 激发。

表 9-82 锡的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
300.9	317.5	ICP	PDL	500	100	303.412	303.412	S/Air/Ac	HCL	70000	48
286.333	317.505	GF	PDL	10(0.5ng)	115	283.999	283.999	S/Air/Ac	HCL	70000	48
—	286.3	CGF	Xe 150	20	117	303.412	303.412	Air/Ac	HCL	100000	49
303.4	303.4	Ar-S/Air/Ac	EDL	50	452	286.333	283.999	Air/Ac	HCL	300000	49
303.4	303.4	Ar/O_2/H_2	EDL	6	452	303.412	303.412	S/Air/Ac	HCL	25000	49
317.5	317.5	Ar/H_2	EDL	6	452	286.333	283.999	S/Air/Ac	HCL	75000	49
284.0	284.0	Ar-S/N_2O/Ac	EDL	300	452		284.0	Ar/Air/H_2	Xe 150	100000	223
317.5	ND	Ar/Air/H_2	EDL	0.6ng	453	303.4	303.4	Ar/O_2/H_2	EDL	120	456
303.4	303.4	ICP	HCL	60	43		286.3	N-S/Air/Ac	Xe 300	1500	180
303.4	303.4	S/Air/Ac	ICP	1000	44	284.0	284.0	ICP	HCL	300	13
303.4	303.4	S/Air/Ac	EDL	500	44	NS	ND	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.1	80
NS	NS	ICP	HCL	35	4	NS	ND	Hy+N/Ar/Air/H_2	EDL	0.6(1.2ng)	456
—	ND SB	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.1ng	75	NS	ND	Ar/Air/H_2	EDL	50pg	312
303.4	303.4	Ar/O_2/H_2	EDL	6	454	300.9	317.5	N-S/Air/Ac	PDL	3	387
NS	NS	GDSC	BHCL	60000	119	286.3	317.5	GF	PDL	0.04(0.2pg)	21
300.915	317.502	ICP	PDL	3	6	300.9	317.5	GF	PDL	1(5pg)	331
303.412	303.412	Ar-S/O_2/H_2	EDL	100	446		303.4	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	1000	187
317.505	317.505	Ar-S/Air/H_2	EDL	300	446		303.4	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	500	28
303.412	303.412	Air/Ac	EDL	600	446		317.5	GF	Xe 150	20(10pg)	186
303.412	303.412	S/Ar/O_2/H_2	EDL	100	446	303.4	303.4	CGF	EDL	20	54
303.412	303.412	N_2-S/Air/H_2	EDL	600	7	303.4	303.4	Air/H_2	EDL	500	55
	303.412	Air/H_2	Xe 150	5000	50	NS	NS	NS	LE	—	457
303.412	303.412	Air/Ac	HCL	200000	48	NS	ND	Hy	EDL	—	61
283.999	283.999	Air/Ac	HCL	300000	48	NS	NS	ICP	HCL	—	197

① 见本章末"参考文献"。

表 9-83 锶的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
460.7	460.7	MIP	HCL	20	1	460.733	460.733	Ar/Air/H_2	EDL	30	51
553.5	550.4	Air/Ac	CDWL	100	98	460.733	460.733	Air/H_2	PDL	10	10
460.7	460.7	Air/Ac	PDL	0.1	201	460.1	460.1	Air/H_2	PDL	30	11
407.8 430.5	416.2	ICP	PDL	1	101		460.7	GF+MNP	Xe 300	20ng	14
						407.8	407.8	ICP	HCL	20	20
460.7	460.7	ICP	HCL	0.7	43	407.7	407.7	ICP	ICP	0.2	22
	460.7	S/Air/Ac	Xe 300	1	219		460.73	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	3	185
	460.7	He/O_2/Ac	Xe 300	80	148		460.73	N-S/Air/Ac	Xe 300	3	27
	460.7	He/O_2/Ac	Xe 300	80	156	460.7	460.7	Air/Ac	PDL	0.3	29
	460.7	Air/Ac	Xe 300	3000	156		460.7	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	3	187
NS	589.0	ICP	HCL	6	5		460.7	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	0.9	28

① 见本章末"参考文献"。

表 9-84 钽的原子荧光测定参数及检出限[13,276]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
NS	NS	ICP	HCL	2000
268.52	276.17	ICP	PDL	20

表 9-85 铽的原子荧光测定参数及检出限[210,211]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
370.285	350.917	N_2O/Ac	PDL	500
432.647	433.845	N_2O/Ac	PDL	1500
403.31	400.56	ICP	PDL	650

表 9-86 碲的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①,②
214.27	0～5.783	$^3P_2$—$^3S_1^0$	29	100
225.90	0～5.486	$^3P_2$—$^5S_2^0$	100	1.9
238.33	0.584～5.783	$^3P_0$—$^3S_1^0$	64	22.3
238.58	0.589～5.783	$^3P_1$—$^3S_1^0$	72	40.8

① 使用高强度空心阴极灯激发。

② 在空气-H 火焰中。

表 9-87 碲的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
214.3	214.3	ICP	PDL	9	34	214.275	214.275	S/Air/Ac	HCL	20000	49
225.9 214.3	ND	GF	EDL	1(1pg)	114		214.275	Air/H_2	Xe 150	50000	50
						NS	NS	ICP	HCL	2	17
283.3	283.3	Air/Ac	EDL	1500	35	—	214.3	N-S/Air/Ac	Xe	400	52
241.3	241.3	Hy+Ar/Air/H_2	EDL	0.08(80pg)	37	214.3	214.3	N-S/Air/Ac	EDL	3300	52
	ND	Ar/Air/H_2	EDL	100(2mg)	3	213.9	213.9	CGF	EDL	3	54
214.3	214.3	S/Air/Ac	ICP	100	44	214.3	214.3	Air/H_2	EDL	70	55
214.3	214.3	S/Air/Ac	EDL	60	44	NS	NS	Hy	EDL		409
	ND	HyVC	EDL	2mg	45	—	ND	Hy	—	—	443
225.904	225.904	Air/Prop	EDL	50	406	NS	ND	Hy	—	—	444
214.275	214.275	O_2/H_2	EDL	500	233	NS	ND	Hy	HCL	0.04(0.02ng)	62
214.275	214.275	Ar/Air/H_2	EDL	500	51	NS	NS	GF	LE	20fg	63
214.275	214.275	N_2-S/Air/H_2	EDL	60	7	NS	ND	Hy	HCL	4	418
214.275	214.275	S/Air/Ac	HCL	20000	48	NS	NS	HG	EDL	1.10	421
214.275	214.275	Air/Ac	HCL	30000	49						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-88 钍的原子荧光测定参数及检出限[22]

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})
283.2	283.2	ICP	ICP	100

表 9-89　钛的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃　迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①②	λ/nm	能级/eV	跃　迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①②
264.66	0.048～4.731	$a\ ^3F_4—u^3D^0_3$	12	8	314.19	0～3.709	$a^3F_2—x^3G^0_3$	55	39
294.20	0～4.211	$a^3F_2—v^3F^0_2$	14	6	335.46	0.021～3.715	$a^3F_3—x^3G^0_4$	52	43
294.83	0.021～4.225	$a^3F_3—v^3F^0_3$	15	10	337.15	0.048～3.724	$a^3F_4—x^3G^0_5$	95	84
295.68	0.021～4.213	$a^3F_3—v^3F^0_2$	20	8	363.55	0～3.409	$a^3F_2—y^3G^0_3$	86	93
318.65	0～3.890	$a^3F_2—w^3G^0_3$	34	17	364.27	0.021～3.424	$a^3F_3—y^3G^0_4$	93	86
319.20	0.021～3.904	$a^3F_3—w^3G^0_4$	43	33	365.35	0.048—3.433	$a^3F_4—y^3G^0_5$	100	100
319.99	0.048～3.921	$a^3F_4—w^3G^0_5$	49	40	399.86	0.048～3.148	$a^3F_4—y^3F^0_4$	80	82

① 使用高强度空心阴极灯激发。

② 在氧化亚氮-乙炔火焰中。

表 9-90　钛的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
307.865	316.257	ICP	PDL	1(150ng)		389.5	389.5	Air/H_2	HIHCL	5000	12
365.350	365.350	S/N_2O/Ac	HCL	10000	9	335.5	335.5	ICP	HCL	400	13
337.145	337.145	S/N_2O/Ac	HCL	30000	9	NS	NS	ICP	HCL	30	17
319.992	319.992	S/N_2O/Ac	HCL	4000	9	—	319.99	N-S/N_2O/Ac	Xe 300	2000	27
295.680	295.680	S/N_2O/Ac	HCL	45000	9	365.4	365.4	N_2O/Ac	PDL	2	29
399.864	399.864	N_2O/Ac	PDL	—	10		320.0	Ar-S/N_2O/Ac	Xe 500	200	28
399.8	399.8	N_2O/Ac	PDL	100	11						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-91　铊的原子荧光光谱

λ/nm	能级/eV	跃　　迁	相对光源发射强度①	相对荧光强度①,②
276.79	0～4.478	$2P^0_{1/2}—6d^2D_{3/2}$	13	18
377.57	0～3.283	$2P^0_{1/2}—7s^2S_{1/2}$	100	100
535.05	0.966～3.283	$2P^0_{3/2}—7s^2S_{1/2}$	80	36

① 使用 EDL 激发。

② 在空气-H 火焰中。

表 9-92　铊的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml⁻¹)	文献①
276.8	352.9 351.9	GF	PDL	0.0005(0.025pg)	445	377.572	377.572	S/Air/H_2	Xe 450	70	203
377	535	GF	PDL	0.01(0.1pg)	228	377.572	377.572	Air/Ac	HCL	200	48
	258.0 276.8 238.0	GF	EDL	1000(1ng)	114	377.572	377.572	S/Air/Ac	HCL	2000	48
377.6	377.6	Air/H_2	HgDL	300	134	276.787	276.787	S/Air/Ac	HCL	25000	48
276.787	352.943	GF	PDL	0.000014(0.7fg)	115	377.572	377.572	Air/Ac	MVI	400	48
377.6	377.6	O_2/H_2	EDL	1	142	276.787	276.787	Air/Ac	MVL	3000	48
377.6	377.6	O_2/Ac	EDL	5	142	377.572	377.572	S/Air/Ac	MVL	100	48
377.6	377.6	Air/H_2	EDL	2	142	276.787	276.787	S/Air/Ac	MVL	500	48
377.6	377.6	Air/NG	EDL	1	142	377.572	377.572	Air/Ac	HCL	3000	49
377.6	377.6	ICP	HCL	7	43	276.787	276.787	Air/Ac	HCL	14000	49
377.6	377.6	S/Air/Ac	ICP	90	44	377.572	377.572	S/Air/Ac	HCL	1200	49
377.6	377.6	S/Air/Ac	EDL	10	44	276.787	276.787	S/Air/Ac	HCL	7000	49
276.8	352.9	Ar/Air/Ac	PDL	0.8	305		377.572	Ar-S/Air/H_2	Xe 150	1000	50
276.8	352.9	GF	PDL	0.01(0.1pg)	305	377.572	535.046	Air/Ac	PDL	20	10
276.787	352.943	ICP	PDL	7	6	377.572	377.572	Air/Ac	PDL	1000	10
377.572	377.572	Air/H_2	EDL	100	447	377	535	GF	PDL	0.005(0.1pg)	234
377.572	377.572	Ar-S/Air/H_2	EDL	8	51	276.8	352.9	GF	PDL	0.000006(60ag)	448
377.572	377.572	O_2/H_2	WVL	40	446	276.787	351.924 352.943	GF	PDL	0.000002	167
377.572	377.572	N_2-S/Air/H_2	EDL	200	7	377.6	377.6	Wloop	EDL	1000(2ng)	112
							377.6	Air/Ac	Xe 500	6000	171
							535.1	Air/Ac	Xe 500	20000	171

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①
377.6	377.6	O_2/H_2	MVL	40	177	377.6	377.6	CGF	EDL	2	54
	377.6	Air/H_2	Xe 150	200	258	377.5	377.6	Air/H_2	EDL	2	55
	377.6	GF+MNP	Xe 300	40ng	14		377.6	Air/Ac	Xe 900	600	30
	535.1	GF+MNP	Xe 300	500ng	14	377.6	377.6	GF	EDL	40(0.02ng)	188
	377.57	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	40	185	377.6	377.6	Air/H_2	EDL	10	189
377.572	377.572	ICP	PDL	8000	107	NS	NS	NS	LE	1	449
	377.57	N-S/Air/Ac	Xe 300	40	27	NS	NS	NS	LE	0.00003(6fg)	450
377.6	377.6	Air/Ac	PDL	4	29	NS	NS	GF	LE	1pg	451
	377.6	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	200	53	NS	NS	ETA	LE	—	259
377.6	377.6	Ar-S/Air/Ac	EDL	300	53	NS	NS	GF	LE	—	320
	377.6	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	10	187			ETA	LE	1fg	269
	377.6	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	6	28	NS	NS	ETA	LE	0.1pg	239
	377.6	GF	Xe 150	4(4mg)	186						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-93 铥的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①
371.792	409.419	N_2O/Ac	PDL	100	210	301.53	313.14	ICP	PDL	140	211
376.133 376.191	376.133 376.191	N_2O/Ac	PDL	5000	210	NS	NS	GD	LE	0.08fg	266

① 见本章末"参考文献"。

表 9-94 铀的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①
591.5	591.5	N_2O/Ac	CWDL	500000	98	286.57	288.96	ICP	LE	200	458
409.01	385.96	ICP	PDL	20	305						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-95 钒的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①
609.0	609.0	N_2O/Ac	CWDL	300	98	NS	NS	ICP	HCL	25	17
609.0	609.0	ICP	CWDL	5000	99	385.6	411.2	GF	PDL	200ng	18
609	609	DCP	PDL	66	103	309.3	309.3	ICP	ICP	40	22
264.8	354.4	GF	PDL	220(2.2ng)	2	411.18	411.18	ICP	ICP	8000	23
318.4	318.4	ICP	HCL	90	43	309.31	309.31	ICP	ICP	1000	23
NS	NS	GDSC	BHCL	100000	119	NS	NS	ICP	ICP	2000	24
268.8	290.9	ICP	PDL	3	305	390.326	390.326	ICP	PDL	700	107
318.4	318.4	ICP	PDL	5	305	318.5	318.5	N-S/N_2O/Ac	ICP	400	26
268.796	290.882	ICP	PDL	3	6		318.40	N-S/N_2O/Ac	Xe 300	100	27
318.398	318.398	S/N_2O/Ac	EDL	70	8	370.4	411.2	N_2O/Ac	PDL	30	29
370.358	411.178	N_2O/Ac	PDL	500	278		318.4	Ar-S/N_2O/Ac	Xe 500	30	28
370.358	438.472	N_2O/Ac	PDL	500	278		318.4	N_2O/Ac	Xe 900	6000	30
318.4	318.4	ICP	HCL	300	13	NS	NS	GF	LE	0.01ng	459
	318.4	Ar-S/N_2O/Ac	Xe150	100	16						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-96 钨的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng\cdot ml^{-1})$	文献①
295.6	295.6	ICP	HCL	3000	43		295.6	ICP	ICP	923	31
NS	NS	ICP	HCL	200	4		295.6	ICP	ICP	900	32
NS	NS	ICP	HCL	2000	13	NS	NS	ICP	ICP	65	382
295.6	295.6	ICP	ICP	923	15						

① 见本章末"参考文献"。

表 9-97　钇的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
319.56	321.67	ICP	PDL	0.6	305	NS	NS	GD	LE	0.0012ng	264
360.1	360.1	ICP	ICP	20	22	NS	NS	ICP	HCL	1500	108
508.742	508.742	ICP	PDL	30	107						

① 见本章末“参考文献”。

表 9-98　镱的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
289.138 506.731	366.970	ICP	PDL	170	263	303.11 369.4	297.06 369.4	ICP ICP	PDL ICP	25 10	211 22
508.743	371.029	ICP	PDL	0.6	6	398.80	398.80	ICP	ICP	150	23
298.798	346.426	N_2O/Ac	PDL	10	210	369.42	369.42	ICP	ICP	30	23
369.419	328.937	N_2O/Ac	PDL	30	210	NS	NS	ICP	ICP	30	24
NS	NS	ICP	HCL	20	13	NS	NS	ICP	ICP	10	24
NS	NS	ICP	HCL	0.7	17	NS	NS	GT-ETA	LE	0.22ng	268

① 见本章末“参考文献”。

表 9-99　锌的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 $c/(ng \cdot ml^{-1})$	文献①
213.9	213.9	MIP	HCL	40	1		213.8	Air/Ac	Xe 300	4000	157
	213.9	MIP	Xe 200	40	1		213.9	Air/Ac	Xe 300	74	158
213.9	213.9	ICP	PDL	0.6	34	213.9	213.9	ICP	HCL	1	159
213.9	213.9	GF	EDL	0.01(10fg)	114	213.9	213.9	ICP	HCL	2	462
	ND SB	GF	EDL	0.1pg	133	213.856	213.856	Air/H_2	EDL	0.04	448
213.9	213.9	Air/H_2	HgDL	0.5	134	213.856	213.856	O_2/H_2	MVL	0.2	7
213.9	213.9	Air/H_2/Air	MVL	0.025	135	213.856	213.856	N_2-S/Air/H_2	EDL	0.2	203
NS	—	Air/Ac	EDL	2	69		213.856	S/Air/H_2	Xe 450	10	163
NS	NS	Air/Ac	HCL	10	69	213.856	213.856	Air/Prop	MVL	3	161
213.8	213.8	Air/Ac	EDL	1	35	213.856	213.856	S/Air/Ac	MVL	0.2	48
213.86	213.86	Air/Ac	HCL	1	250	213.856	213.856	Air/Ac	HCL	300	48
NS	NS	S/Air/Ac	HCL	2	218	213.856	213.856	S/Air/Ac	HCL	150	48
213.9	213.9	S/Air/Ac	HCL	7	202	213.856	213.856	Air/Ac	HIHCL	5	48
213.9	213.9	S/Air/Ac	HCL	8	251	213.856	213.856	S/Air/Ac	HIHCL	3	49
213.9	213.9	CGF	EDL	0.3	138	213.856	213.856	Air/Ac	HCL	130	49
NS	NS	S/Air/H_2	HCL	20	139	213.856	213.856	S/Air/Ac	HCL	100	50

续表

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
213.9	213.9	O_2/H_2	MVL	0.1	177	213.9	213.9	Ar-S/Air/Ac	EDL	2	53
213.9	213.9	O_2/H_2	MVL	40	178		213.9	Ar-S/Air/Ac	PXe 300	9	187
213.9	213.9	O_2/Ac	MVL	40	178		213.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 500	15	28
213.9	213.9	ICP	HCL	0.5	13		213.9	GF	Xe 150	2(1pg)	186
213.9	213.9	N-S/Air/Ac	DCP	6	81	213.8	213.8	CGF	EDL	0.2	54
213.9	ND	Air/Ac	EDL	3	182	213.8	213.8	Air/H_2	EDL	5	55
213.9	213.9	ICP	HCL	1.2	183	213.9	213.9	GF	EDL	0.2(0.1pg)	188
213.9	213.9	ICP	ICP	6	15	213.9	213.9	Air/H_2	EDL	0.2	189
	213.9	Ar-S/Air/Ac	Xe FL	100	16	NS	NS	GF	HIHCL	0.0001	83
	213.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 150	6	16		213.9	ICP	ICP	6	31
NS	NS	ICP	HCL	<0.1	17	213.9	213.9	GF	EDL	0.00029	123
	213.9	N-S/Air/Ac	Xe	10	52		213.9	GF	Xe 150	6	123
213.9	213.9	N-S/Air/Ac	EDL	3	52	213.8	213.8	ICP	EDL	1	190
	213.86	N-S/Air/Ac	Xe 150	45	106		213.9	ICP	ICP	4	32
213.9	213.9	ICP	HCL	70	20	213.9	213.9	Air/H_2	HIHCL	30	469
202.5	202.5	ICP	HCL	6000	20	213.9	213.9	Air/H_2	MVL	2.4	469
	213.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	300	236	213.9	213.9	Air/H_2	EDL	0.4	469
213.9	213.9	ICP	ICP	2	22	213.8	213.8	W Spiral	EDL	0.04pg	122
213.86	213.86	ICP	ICP	6	23	213.9	213.9	ICP	HCL	1	207
206.20	206.20	ICP	ICP	600	23			GT	LPDL	--	239
	213.76	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	20	185	NS	NS	Tungsten-spiral	EDL	0.005	194
213.9	213.9	N-S/Air/Ac	ICP	0.5	26	NS	213.9	ICP	HCL	0.089	470
213.9	213.9	Air/Ac	ICP	13	205				ICP	0.2	471
	213.86	N-S/Air/Ac	Xe 300	20	27	NS	NS	ICP	HCL	—	197
	213.9	Ar-S/Air/Ac	Xe 300	300	53	NS	213.9	MIP	HCL	1.2	198

① 见本章末"参考文献"。

表 9-100 锗的原子荧光测定参数及检出限

激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①	激发 λ_A/nm	荧光 λ_F/nm	原子化器	激发光源	检出限 c/(ng·ml^{-1})	文献①
—	360.1	Furnace	Xe1000	50pg	472	389.0	389.0	Air/H_2	HIHCL	10000	12
310.66	256.89 257.14	ICP	PDL	3	305	339.2	339.2	ICP	ICP	10	22
						310.66	256.89	ICP	PDL	21	276
310.658	256.887	ICP	HCL	3	6						

① 见本章末"参考文献"。

参 考 文 献

1 Perkins L D, Long G L. Appl Spectrosc, 1988; 42: 1285
2 Dittrich K, Stärk H. J Anal Atom Spectrosc, 1987; 2: 63
3 Nakahara T, Wakisaka T, Musha S. Spectrochim Acta, 1981; 36B: 661
4 Jansen E B M, Demers D R. Analyst, 1985; 110: 541
5 Yeah K S, Masamba W. Winefordner J D. Anal Sci, 1987; 3: 245
6 Omenetto N, Human H G C, Cavalli P et al. Spectrochim Acta, 1984; 39B: 115
7 Kachin S V, Smith B W, Winefordner J D. Appl Spectrosc, 1985; 39: 587
8 Dagnall R M, Taylor M R G, West T S. Spectrosc Lett, 1968; 1: 397
9 Dagnall R M, Kirkbright G F, West T S et al. Anal Chem, 1970; 42: 1029
10 Fraser L M, Winefordner J D. Anal Chem, 1972; 44: 1444
11 Fraser L M, Winefordner J D. Anal Chem, 1971; 43: 1693
12 Dinnin J I. Anal Chem, 1967; 39: 1491
13 Demers D R. Spectrochim Acta, 1985; 40B: 93
14 Macaffrey J T, Michel R G. Microchem J, 1988; 3: 357
15 Greenfield S, Thomsen M. Spectrochim Acta, 1986; 41B: 677
16 Johnson D J, Plankey F W, Winefordner J D. Anal Chem, 1974; 46: 1808
17 Demers D R. Amer Lab, 1987; (8): 30
18 Goforth D, Winefordner J D. Talanta, 1987; 34: 290
19 Yeah K S, Masamba W, Winefordner J D. Anal Sci, 1987; 3: 245

20 Masamba W R,Smith B W. Krupa R J et al. Appl Spectrosc,1988;42:872
21 Goforth D,Winfordner J D. Anal Chem,1986;58:2598
22 Krupa R J,Long G L,Winfordner J D. Spectrochim Acta,1985;40B:1485
23 Kosinski M A,Uchida H,Winfordner J D. Anal Chem,1983;55:688
24 Long G L,Winfordner J D. Appl Spectrosc,1984;38:563
25 Wynn T F,Clardy P,Vaughn L et al. Anal Chim Acta,1981;124:155
26 Epstein M S,Nikdel S,Omenetto N et al. Anal Chem,1979;51:2071
27 Ullman A H,Pollard B D,Boutillier G D et al. Anal Chem,1979;51:2382
28 Johnson D J,Plankey F W,Winfordner J D. Anal Chem,1975;47:1739
29 Weeks S J,Haraguchi H,Winfordner J D. Anal Chem,1978;50:360
30 Fowler W K,Knapp D O,Winfordner J D. Anal Chem,1974;46:601
31 Greenfield S,Malcolm K F M. Thomsen M. J Anal Atom Spec,1987;2:711
32 Greenfield S,Thomsen M. Spectrochim Acta,1988;40B:1369
33 Enger J,Malmsten Y,Ljungberg P. Analyst,1995;120:635
34 Leong M B,D'Silva A P,Fassel V A. Anal Chem,1986;58:2594
35 Norris J D,West T S. Anal Chem,1973;45:226
36 Kolihova D,Sychra V. Anal Chim Acta,1972;59:477
37 Thompson K C. Analyst,1975;100:307
38 Tsujii K,Kuga K. Anal Chim Acta,1978;97:51
39 Nakahara T,Kobayashi S,Musha S. Anal Chim Acta,1978;101:375
40 Sullivan J V. Anal Chim Acta,1979;105:213
41 Nakahara T,Kobayashi S,Musha S. Anal Chem,1979;51:1589
42 Jsujii K. Anal Lett,1981;14:181
43 Demers D,Allemand C. Anal Chem,1981;53:1915
44 Montaser A. Spectrosc Lett,1978;12:725
45 Braun K,Slavin W,Walsh A. Spectrochim Acta,1982;37b:721
46 Tsujii K,Kitazume E,Yagik. Anal Chim Acta,1981;128:229
47 Dagnall R M,Thompson K C,West T S. Talanta,1967;14:1151
48 Larkins P L. Spectrochim Acta,1971;26B:477
49 Browner R F,Manning D C. Anal Chem,1972;44:843
50 Bratzel M P,Dagnall R M,Winefordner. Anal Chim Acta. 1970;52:157
51 Zacha K E,Bratzel M P,Mansfield J M et al. Anal Chem,1968;40:1733
52 Wu M W,Michel R G. Analyst,1985;110:937
53 Ullman A H,Favez C M P,Winefordner J D et al . Spectrosc,1977;22:43
54 Molnar C J,Winfordner J D. Anal Chem,1974;46:1807
55 Knapp D O,Molnar C J,Winefordner J D. Anal Chem,1974;46:622
56 陈全武,王芹香. 岩矿测试,1989;8(1):51
57 李朝阳. 理化检验——化学分册,1989;25(5):271
58 戴建中. 分析试验室,1989;8(2):61
59 袁有瑞,黄雅丽. 光谱学与光谱分析,1992;12(2):87
60 金泽洋,汤志勇,周俊明等. 光谱学与光谱分析,1992;12(4):75
61 胡均国,岳诚,雷诗奇等. 冶金分析,1993;13(1):51
62 Guo T,Liu M,Schrader W. J Anal At Spectrom ,1992;7(4):667
63 Liang Z W,Lonardo R F,Michel R G. Spectrochim Acta Part B,1993;48B(1):7
64 乔　晋,刘时芳. 理化检验——化学分册,1993;29(5):265
65 林守麟,邱海鸥,汤志勇. 岩矿测试,1994;13(2):113
66 Ulivo A D,Lampugnani L,Pellegrini G et al. J Anal At Spectrom,1995;10(11):969
67 殷尚海. 理化检验——化学分册,1996;32(4):238
68 肖 凡. 岩矿测试,1992;11(4):361
69 Barnett W B,Kahn H L. Anal Chem,1972;44:935
70 Tsujii K,Kuga K. Anal Chim Acta,1974;72:85
71 Nakahara T,Tanaka T,Musha S. Bull Chem Soc Japan,1978;51:2046
72 Heithmar E M,Plankey F W. Appl Spectrosc,1978;32:208
73 Kuga K,Tsujii K. Anal Lett,1982;15:47
74 Ebdon L,Wilkerson J R,Jackson K W. Anal Chim Acta,1982;136:191
75 D'ulivo A,Panoff P,Festa C. Talanta,1983;30:907
76 Nakahara T,Kobayashi S,Musha S. Anal Chim Acta,1979;104:173
77 Tsujii K,Kitazume E. Anal Chim Acta,1981;125:101
78 Dagnall R M,West T S. Appl Opt,1968;7:1287
79 Dagnall R M,Thompson K C,West T S. Talanta,1968;15:677
80 D'ulivo A. Fuoco R,Papoff P. Talanta,1985;32:103
81 Goliber P A,Hendrick M S,Michel R G. Anal Chem,1985;57:2520
82 Ebdon L,Wilkerson J R. Anal Chim Acta,1987;194:177

83 Amos M D,Bennett P A,Brodie K G et al. Anal Chem,1971;43:211
84 王 烨,戴佳毅.理化检验——化学分册,1988;24(6):370
85 王 烨,张文学.分析试验室,1988;7(10):61
86 王 烨,屈桂馥.岩矿测试,1989;8(1):64
87 朴哲洙,杨昌宇.分析化学,1988;16(8):767
88 郑 英,罗方若,郎春燕.岩矿测试,1990;9(1):65
89 李朝阳.理化检验——化学分册,1990;26(6):346
90 Ji W,Fan M. J Environ Sci,1990;2(1):109
91 覃维荣,吴健玲,黄佩芳.岩矿测试,1992;11(3):290
92 Corns W T,Stockwell P B. Ebdon L et al. J Anal At Spectrom,1993;8(1):71
93 Stock-Well P B,Crons W T. Spectrosc World,1992;4(1):14
94 Heitmann U,Sy T,Hese A et al. J Anal At Spectrom,1994;9:437
95 Woller A,Mester Z,Fodor P. J Anal At Spectrom,1995;10(9):609
96 Hueber D,Smith B W,Madden S et al. Appl Spectrosc,1994;48(10):1213
97 Green R B,Travis J C,Keller R A. Anal Chem,1976;48:1954
98 Smith B W,Blackburn M B,Winefordner J D et al. Spectrosc,1977;22:57
99 Pollard B D,Blackburn M B,Nikdel S et al. Appl Spectrosc,1979;33:5
100 Epstein M S,Nikdel S,Bradshaw J D et al. Anal Chim Acta,1980;113:221
101 Omenetto N,Smith B W,Hart L P et al. Spectrochim Acta,1985;40B:1411
102 Denisov L K,Loshin A F,Kozlov N A et al. Zh Prikl Spectrosk,1985;43:566
103 Hendrick M S,Seltzer M D,Michel R G. Spectrosc Lett,1986;19:141
104 Denisov L K,Loshin A F,Nikiforov V G et al. Z Laboratoriya,1987;53:34
105 Denton M B,Malmstadt H V. Appl Phys Lett,1971;18:485
106 Mchard J A,Foulk S J,Nikdel S et al. Anal Chem,1979;51:1613
107 Uchida H,Kosinski M A,Winefordner J D. Spectrochim Acta,1983;38B:5
108 Mazo G N,Glavin G G,Zheleznova A A. Zh Anal Khim,1992;47(10-11):1901
109 Bratzel M P,Dagnall R M,Winefordner J D. Anal Chem,1969;41:1527
110 Hingle D N,Kirkbright G F,West T S. Analyst,1968;93:522
111 Robinson J W,Hsu C J. Anal Chim Acta,1968;43:109
112 Bratzel M P,Dagnall R M,Winefordner J D. Appl Spectrosc,1970;24:518
113 Döbele H F,Hoerl M,Roewekamp M et al. Appl Phys,1986;B39:91
114 Hargreaves M,King A F,Norris J D et al. Anal Chim Acta,1979;104:85
115 Falk H,Paetzold H J,Schmidt K P et al. Spectrochim Acta,1988;43B;1101
116 Hofton M E,Hubbard D P. Anal Chim Acta,1972;62:311
117 Clyburn S A,Bartschmid B R,Veillon C. Anal Chem,1974;46:2201
118 Kobayashi S,Nakahara T,Musha S. Talanta,1979;26:951
119 Gough D S,Meldrum J R. Anal Chem,1980;52:642
120 Dagnall R M,Thompson K C,West T S. Talanta,1967;14:1467
121 Hobbs R S,Kirkbright G F,West T S. Talanta,1971;18:859
122 Murphy M K,Clyburn S A,Veillon C. Anal Chem ,1973;45:1468
123 Atnashev Yu B,Korepanov V E,Muzgin V N. J Appl Spectrosc,1983;39:1230
124 Chen Y,D'ulivo A. Anal Lett,1989;22:1609
125 殷尚海,张汉明.理化检验—— 化学分册,1992;28(6):369
126 马岭聆,华菊如.理化检验—— 化学分册,1993;29(4):246
127 Bolshov M A,Rudner S N,Brust J. Spectrochim Acta Part B,1994;49B(12-14):1437
128 Bolshov M A,Rudner S N,Candelone J-P et al. Spectrochim Acta Part B,1994;49B(12-14):1445
129 Bolshov M A,Boutron C F. Analusis. 1994;22(7):M44
130 董灵英.岩矿测试,1992;11(1—2):58
131 Wiltshire G A,Bolland D T,Littlejohn D. J Anal At Spectrom,1994;9(11):1255
132 Rains T C,Epstein M S,Menis O. Anal Chem,1974;46:207
133 Kuga K,Tsujii K. Anal Chim Acta,1976;81:305
134 Omenetto N,Rossi G. Anal Chim Acta,1968;40:195
135 Denton M B,Malmstadt V. Anal Chem,1972;44:1813
136 Beiyaev Y I,Maryakin A V,Pchelintsev A M. J Anal Chem,USSR,1970;25:852
137 Murugaiyan P,Natarajan S. Venkateswarlu Ch. Anal Chim Acta,1973;64:132
138 Black M S,Glenn T H,Bratzel M P et al. Anal Chem,1971;43:1769
139 Palermo E F,Montaser A,Crouch S R. Anal Chem,1974;46:2154
140 Brinkman D W,Sacks R D. Anal Chem,1975;47:1279
141 Doolan K J,Smythe L E. Spectrochim Acta,1977;32B:115
142 Winefordner J D,Staab R A. Anal Chem,1964;36:1367
143 Salin E,Ingle J D. Anal Chim Acta,1979;104:267
144 Thomassen J Ip Y,Butler L R P,Badziuk B et al. Anal Chim Acta,1979;110:1
145 Tsujii K,Kuga K,Murayama S et al. Anal Chim Acta,1979;111:103

146 Hughes K. Fry R C. Appl Spectrosc,1981;35:26
147 Seltzer M D,Michel R G. Anal Chem,1983;55:2444
148 Wilson D A,Yuen A M,Hieftje G M. Anal Chim Acta,1985;171:241
149 Muragaiyan P,Natarajan S,Venkateswarlu Ch. Anal Chim Acta,1974;69:451
150 Epstein M S,Rains T C,Menis O et al. J Spectrosc,1975;20:22
151 Worrell G J,Vickers T J,Williams I D,Anal Chim Acta,1975;75:453
152 Dittrich K,Wennrich R. Mikrochim Acta,1977;I;495
153 Brinkman D W,Whisman M L,Goetzinger J. Appl Spectrosc,1979;33:245
154 Belyaev Y L,Pchelintsev A M. Zh Anal Khim,1970;25(11):2094
155 Cavalli P,Omenetto N,Rossi G. Atom Spectrosc,1982;3:1
156 Wilson D A,Yuen A M,Hieftje G M. Anal Chim Acta,1985;171:241
157 Ekanem E J. Barnard C L R,Ottaway J M et al. Talanta,1986;33:55
158 Lancione R L,Drew D M. Industrial R & D,1983;100
159 Sanzolone R F. J Anal Atom Spectrosc,1986;1;343
160 Ekanem E J,Barnard C L,Ottaway J M et al. J Anal Atom Spectrosc,1986;1:349
161 Hobbs P S.Kirkbright G F,Sargant M et al. Talanta,1968;15;997
162 Veillon C,Mansfield J M,Parsons M L et al. Anal Chem,1966;38:204
163 Dagnall R M,Thompson K C,West T S. Anal Chim Acta,1966;36:269
164 Bratzel M P,Dagnall R M,Winefordner J D. Anal Chem,1969;41:713
165 Weide J D,Parsons M L. Anal Chem,1973;45:2417
166 Lancione R L,Drew D M. Spectrochim Acta,1985;40B;107
167 Omenetto N,Cavalli P,Broglia M et al. At Spectrom,1988;3;231
168 Epstein M S,Rains T C,Menis O. J Spectrosc. 1975;20:22
169 Goode S R,Montaser A,Crouch S R. Appl Spectrosc,1973;27;355
170 Bratzel M P,Dagnall R M,Winefordner J D. Anal Chim Acta,1969;48:197
171 Cresser M S,West T S. Spectrochim Acta,1970;25B;61
172 Elser R C. Appl Spectrosc,1971;25;345
173 Shull M,Winefordner J D. Anal Chem,1971;43:99
174 Kuga K,Tsujii K. Anal Chim Acta,1976;81:305
175 Vikers T J,Vaught R M. Anal Chem,1969;41;1476
176 Dagnall R M,West T S,Young P. Talanta,1966;13:803
177 Mansfield J M,Winefordner J D,Veillon C. Anal Chem,1965;37;1049
178 Winfordner J D,Staab R A. Anal Chem,1964;36:165
179 Novak J W,Browner R F. Anal Chem,1978;50;1453
180 Mccaffrey J T,Wu M W,Michel R G. Analyst,1983;108;1195
181 Omenetto N,Crabi G,Nasti A et al. Spectrochim Acta,1983;38B:549
182 Naranjit D A,Radziuk B H,Van Loon J C. Spectrochim Acta,1984;39B:969
183 Sanzolone R F,Meier A L. Analyst. 1986;111:645
184 Tie-Zheng G,Stephens R. J Anal Atom Spec,1986;1;355
185 Davis L A,Krupa R J,Winefordner J D. Anal Chim Acta,1985;173:51
186 Chuang F S,Winefordner J D. Appl Spectrosc,1975;29:412
187 Johnson D J,Fowler W K,Winefordner J D. Talanta,1977;24;227
188 Patel B M,Fowler W K,Browner R F et al. Appl Spectrosc,1973;27:171
189 Patel B M,Browner R F,Winefordner J D. Anal Chem,1972;44:2272
190 Montaser A,Fassel V A. Anal Chem,1976;48:1490
191 Ekanem E J. Bull Chem Soc Japan,1984;57;2979
192 Atnashev Yu B,Korepanov V E,Muzgin V N. J Appl Spectrosc,1983;39:1230
193 D'ulivo A,Chen Y. J Anal At Spectrom,1989;4:319
194 Dracheva L V,Gonchakov A S. Zavod Lab,1990;56(2):38
195 Bolshov M A,Rudnev S N,Huetsch B. J Anal At Spectrom,1992;7(1):1
196 Bolshov M A,Koloshnikov V G. Rudnev S N et al. J Anal At Spectrom,1992;7(2):99
197 陈云林,李素萍,韩　波. 理化检验——化学分册,1993;29(3);163
198 段忆翔,杜晓光,刘　军等. 分析化学,1993;21(5):610
199 Guo X W, Guo X M. Anal Chim Acta, 1995; 310 (2); 377
200 Seltzer M D, Hendrick M S, Michel R G. Anal Chem, 1985; 57: 1096
201 Horvath J J. Bradshaw J D, Bower J N et al. Anal Chem. 1981; 53: 6
202 Dagnall R M, Kirkbright G F, West T S et al. Anal Chem, 1971; 43: 1765
203 Ellis D W,Demers D R. Atomic Fluorescence Flame Spectrometry in Trace Inorganics in Water ,R A Bellar,Ed.,Advanced in Chemistry Series No 73 (American Chemical Society Washington. D. C. 1968)
204 Demers D R, Ellis D W. Anal Chem, 1968; 40: 860
205 Omenetto N, Nikdel S, Bradshaw J D et al. Anal Chem, 1979; 51: 1521
206 Greenfield S, Solman M S, Tyson J F. Spectrochim Acta Part B, 1988; 43B: 1087
207 Zhu S F, Wang H, Keliher P N, Microchem J, 1988; 38; 264

208 Bogen P, Döbele H F, Mertens Ph. J Nucl Mater, 1987; 145—147: 434
209 Döbele H F, Buckle B. J Nucl Mater, 1982; 111—112: 102
210 Omentto N, Hatch N N, Fraser L M et al. Anal Chem 1973; 45: 195
211 Tremblay M E, Smith B W, Winefordner J D. Anal Chim Acta, 1987; 199: 111
212 Hohimer J P, Hargis P I. Appl Phys Lett, 1977; 30: 344
213 Heaven M, Miller T, Freeman R et al. Chem Phys Lett, 1982; 86: 458
214 Clyne M A A, Ono Y. Chem Phys Lett, 1983; 94: 597
215 Selwyn G S, Baston L D, Sawin H H. Appl Phys Lett, 1987; 51: 898
216 Bemand P P, Clyne M A A. J Chem Soc Faraday Trans, 1975; 71: 1132
217 Kwong K S, Measures R M. Anal Chem, 1979; 51: 428
218 Jones M, Kirkbright G F, Ranson L et al. Anal Chim Acta, 1973; 63: 210
219 Mccaffrey J T, Michel R G. Anal Chem, 1983; 55: 488
220 Rossi G, Omenetto N. Talanta, 1969; 16: 263
221 Norris J D, West T S. Anal Chim Acta, 1972; 59: 355
222 Measures R M, Kwong H S. Appl Opt, 1979; 18: 281
223 Miller R L, Fraser L M, Winefordner J D. Appl Spectrosc, 1971; 25: 477
224 Norris J D, West T S. Anal Chem, 1973; 45: 2148
225 Gough D S, Hannaford P, Walsh A. Spectrochim Acta, 1973; 28B: 197
226 Bolshov M A, Zybin A V, Smirenkina L I. Spectrochim Acta, 1981; 36B: 1143
227 Bolshov M A, Zybin A V, Koloshnikov V G et al. Spectrochim Acta, 1986; 41B: 487
228 Preli P R, Dougherty J P, Michel R G. Anal Chem, 1987; 47; 1784
229 Gustavsson A, Ingman F. Spectrochim Acta, 1979; 34B: 31
230 Wolfe T C, Vickers T J. Appl Spectrosc, 1978; 32: 265
231 Fleet B, Liberty H V, West T S. Anal Chim Acta, 1969; 45: 205
232 Matousek J, Sychra V. Anal Chem, 1969; 41: 518
233 Mansfield J M, Bratzel M P, Norgordon H O et al. Spectrochim Acta, 1968; 21B: 389
234 Dougherty J P, Preli F R, Michel R G. J Anal At Spectrom, 1987; 2: 429
235 Bolshov M A, Zybin A V, Koloshnikov V G et al. Spectrochim Acta, 1988; 43B: 519
236 Kujiral O, Davis L, Winefordner J D. Spectrosc Lett, 1985; 18: 781
237 Cresser M S, West T S. Spectrochim Acta, 1970; 25B: 61
238 Bolshov M A, Zybin A V, Koloshnikov V G et al. Spectrochim Acta Part B, 1988; 43B: 519
239 Dougherty J P, Preli F R, Michel R G. Talanta, 1989; 36: 151
240 Irwin R L, Wei G-T, Butcher D J et al. Spectrochim Acta Part B, 1992; 47B (13): 1497
241 Rigin V. Anal Chim Acta, 1993; 283: 895
242 Gornushkin I B, Zilbershtein Kh I, Rossomakhina M V. Vysokochist Veshchestva, 1993; 6: 114
243 Zybin A V, Kunets A V. Zh Prikl Spektrosk, 1993; 59: 435
244 Yuzefovsky A I, Lonardo R F, Michel R G. Anal Chem, 1995; 67 (13): 2246
245 Yuzefovsky A I, Lonardo R F, Wang M et al. J Anal At Spectrom, 1994; 9 (11): 1195
246 Rigin V I. Zh Anal Khim, 1990; 45 (9): 1733
247 Gornushkin I B, Zil'bershtein Kh I. Zh Prikl Spektrosk, 1990; 52 (3): 363
248 Mitchell D G, Johansson A. Spectrochim Acta, 1971; 26B: 677
249 Kolihova K, Sychra V. Anal Chim Acta, 1973; 63: 479
250 Kolihova K, Sychra V. Chimicke Listy, 1972; 66: 93
251 Dagnall R M, Kirkbright G F, West T S et al. Analyst, 1972; 97: 245
252 Chupakhin M S, Dorofeev V S, Aidarov T K. J Anal Chem, USSR, 1974; 20: 1053
253 Lipari F, Plankey F W. Anal Chem, 1978; 50: 386
254 Manning D L, Heneage P. Atom Abs Newslett, 1967; 6: 124
255 Human H G C. Spectrochim Acta, 1972; 27B: 301
256 Cotton D H, Jenkins D R. Spectrochim Acta, 1970; 25B: 283
257 Smith R, Elser R C, Winefordner J D. Anal Chim Acta, 1969; 48: 35
258 Manning D C, Heneage P. Atom Abs News, 1968; 7: 80
259 Liang Z, Wei G-T, Irwin R L et al. Anal Chem, 1990; 62 (14): 1452
260 Mazo G N, Glavin G G, Zheleznova A A. Zh Anal Khim, 1992; 47 (10-11): 1901
261 Simeonsson J B, Ng K C, Winefordner J D. Anal Chim Acta, 1992; 258 (1): 73
262 D'ulivo A, Lampugnani L, Pellegrini G et al. J Anal At Spectrom, 1995; 10 (11): 969
263 Tremblay M E, Simeonsson J B, Smith B W et al. Appl Spectrosc, 1988; 42: 281
264 Davis C L, Smith B W, Bolshov M A et al. Appl Spectrosc, 1995; 49 (7): 907
265 王小如，凌 东，林跃何等. 光谱学与光谱分析，1990；10(5):31
266 Omenetto N, Rossi G. Spectrochim Acta, 1972; 27B: 301
267 Benetti P, Omenetto N, Rossi G. Appl Spectrosc, 1971; 25: 57
268 Vera J A, Stevenson C L, Smith B W et al. J Anal At Spectrom, 1989; 4: 619
269 Vera J A, Leong M B, Stevenson C L et al. Talanta, 1989; 36: 1291
270 Dagnall R M, Thompson K C, West T S. Anal Chim Acta, 1988; 41: 551

271 Dagnall R M, Kirkbright G F, West T S et al. Analyst, 1970; 95: 425
272 龚楚舒，袁 园，郭小伟．理化检验——化学分册，1992；28(2):116
273 Dinnin J F. Anal Chem, 1967; 39: 1491
274 Matousek J, Sychra V. Anal Chim Acta, 1970; 49: 175
275 Larkins P L. Anal Chim Acta, 1985; 173: 77
276 Huang X, Lanauze J, Winefordner J D. Appl Spectrosc, 1985; 39: 1042
277 Masera E, Mauchien P, Lerat Y. J Anal At Spectrom, 1995; 10 (2): 137
278 Omenetto N, Hatch N N, Fraser L M et al. Spectrochim Acta, 1973; 28B: 65
279 Goldsmith J E M, Anderson R J M. Appl Optics, 1985; 24: 607
280 Alden M, Schawlow A L, Svanberg S et al. Opt Lett, 1984; 9: 211
281 Patel B M, Winefordner J D. Spectrochim Acta, 1986; 41B: 469
282 Thompson K C. Spectrosc Lett, 1970; 3: 59
283 Brewer L, Tellinghuisen J B. J Chem Phys, 1971; 54: 5133
284 Bolshov M A, Zybin A V, Koloshnikov V G et al. Zh Prikl Spektrosk, 1978; 28: 45
285 Womack J B, Gessler E M, Winefordner J D. Spectrochim Acta Part B, 1991; 46B: 301
286 Glick M, Smith B W, Winefordner J D. Anal Chem, 1990; 62 (2): 157
287 Bolshov M A, Zybin A V, Zybina L A et al. Spectrochim Acta, 1976; 31B: 493
288 Epstein M S, Bayer S, Bradshaw J et al. Spectrochim Acta, 1980; 35B: 233
289 Rippetoe W E, Muscat V L, Vickers T J. Anal Chem, 1974; 46: 796
290 Rando L C, Heithmar E M. Spectrosc Lett, 1983; 16: 95
291 Smith R, Stafford C M, Winefordner J D. Can Spectrosc, 1969; 14: 2
292 Ebdon L, Kirkbright G F, West T S. Anal Chim Acta, 1969; 47: 563
293 Gornushkin I B, Zil'bershtein Kh I. Zh Prikl Spectrosk, 1990; 52: 363
294 Khvostikov V A, Grazhulene S S, Golloch A et al. J Anal At Spectrom, 1995; 10 (2): 161
295 Kuhl J, Spitschan H. Optics Comm, 1973; 7 (3): 256
296 Neumann S, Kriese M. Spectrochim Acta, 1974; 29B: 127
297 Bolshov M A, Zybin A V, Koloshnkov V G et al. Spectrochim Acta, 1981; 36B: 345
298 Omenetto N, Human H G C, Cavalli P et al. Analyst, 1984; 109: 1067
299 Dittrich K, Stärk H. J Anal Atom Spectrosc, 1986; 1: 237
300 Radziuk B, Thomassen Y, Butler L R P et al. Anal Chim Acta, 1979; 108: 31
301 D'ulivo A, Papoff P. Talanta, 1985; 32: 383
302 Smith B W, Omenetto N, Winefordner J D. Spectrochim Acta, 1984; 39B: 1389
303 Sthapit P R, Ottaway J M, Fell G S. Analyst, 1983; 108: 235
304 Human H G C, Norval E. Anal chim Acta, 1974, 73: 73
305 Human H G C, Omenetto N, Cavalli P et al. Spectrochim Acta, 1984; 39B: 1345
306 Leong M, Vera J, Smith B W et al. Anal Chem, 1988; 60: 1608
307 Sychrav, Matousek J. Talanta, 1970; 17: 363
308 Browner R F, Dagnall R M, West T S. Anal Chim Acta, 1970; 50: 375
309 Miziolek A W, Willis R J. Opt Lett, 1981; 6: 528
310 Sthapit P R, Ottaway J M, Fell G S. Analyst, 1984; 109: 1061
311 D'ulivo A, Fuoco R, Papoff P. Talanta, 1986; 33: 401
312 D'ulivo A, Papoff P. J Anal Atom Spec, 1986; 1: 479
313 Nakahara T, Wasa T. Anal Sci, 1985; 1: 291
314 Leong M, Vera J, Smith B W et al. Anal Chem, 1988; 60: 1605
315 吕江南，郑 毅，徐礼芳等．岩矿测试，1988；7(3):213
316 Vera J A, Leong M B, Omenetto N et al. Spectrochim Acta Part B, 1989; 44: 939
317 Bolshov M A, Boutron C F, Zybin A V. Anal Chem, 1989; 61: 1758
318 Boutron C F, Bolshov M A, Koloshnikov V G et al. Atmos Environ, 1990; 24A: 1797
319 Dashin S A, Boshov M A, Karpov Yu A et al. Zh Anal Khim, 1990; 45 (5): 942
320 Iriwin R L, Butcher D J, Takahashi J et al. J Anal At Spectrom, 1990; 5: 603
321 Deavor J P, Becerra E, Smith B W et al. Can J Appl Spectrosc, 1993; 38 (1): 7
322 Cheam V, Lechner J, Sekerka I et al. Anal Chim Acta, 1992; 269 (1): 129
323 Cheam V, Lechner J, Sekerka I et al, J Anal At Spectrom, 1994; 9: 315
324 Cheam V, Lechner J, Desrosiers R et al. Int J Environ Anal Chem, 1993; 53 (1): 13
325 Davis C L, Smith B W, Winefordner J D. Microchem J, 1995; 52 (3): 383
326 Lewis A L, Beenen J, Hosch J W et al. Appl Spectrosc, 1983; 37: 263
327 王芹香．分析试验室，1992；11(2):75
328 Zybin A V, Schnuerer-Patschar C, Niemax K. Spectrochim Acta Part B, 1992; 47B (14): 1519
329 West T S, Williams X K. Anal Chim Acta, 1968; 42: 29
330 Ellis D W, Demors D R. Anal Chem, 1966; 38: 1943
331 Wittman P, Winefordner J D, Can J Spectrosc, 1984; 29: 75
332 Butcher D J, Irwin R L, Takahashi J et al. Appl Spectrosc, 1990; 44 (9): 1521
333 Rodgers M O, Bradshaw J D, Liu K et al. Optics Lett, 1982; 7: 359

334 Morita H, Kimota T, Shimomuru S. Anal Lett, 1983; 16: 1187
335 Bertenshaw M P, Wagstaff K. Analyst, 1982; 107: 664
336 Caupeil J E, Hendrikse P W, Bongers J S. Anal Chim Acta, 1976; 81: 53
337 Hutton R C, Preston B. Analyst, 1980; 105: 981
338 Ebdon L, Wilkinson J R, Jackson K W, Anal Chim Acta, 1981; 128: 45
339 Ebdon L, Wilkinson J R, Jackson K W. Analyst, 1982; 107: 269
340 Kimoto T, Morimune H, Morita H et al. Bunseki Kagaku, 1982; 31: 637
341 Kuhl J, Marowsky G. Opt Commun, 1971; 4: 125
342 Warr P D. Talanta, 1970; 17: 543
343 Vitkun R A, Poluektov N S, Zelyukova Y V. Zh Anal Khim, 1969; 25: 474
344 Vickers T J, Merrick S P. Talanta, 1968; 15, 873
345 Muscat V I, Vickers T J. Anal Chim Acta, 1971; 57: 23
346 Godden R G, Stockwell P B. J Anal At Spectrom, 1989; 4: 301
347 杨世德. 理化检验——化学分册, 1989; 25(2):97
348 Borgnon J, Stockwell P B. Spectra 2000, 1989; 17: 51
349 聂竹兰, 周肇茹. 岩矿测试, 1990; 9(1):48
350 Temmerman E, Vandecasteele C, Vermeir G et al. Anal Chim Acta, 1990; 236(2): 371
351 Sugimoto M, Morita H, Shimomura S. Bunseki Kagaku, 1990; 39 (5): 251
352 Morita H, Sugimoto M, Shimomuras. Anal Sci, 1990; 6(7): 91
353 Duan Y, Kong X, Zhang H et al. J Anal At Spectrom, 1992; 7 (1): 7
354 Vermeir G, Vandecasteele C, Dams R. Anal Chim Acta, 1991; 242 (2): 203
355 朱 敏. 岩矿测试, 1990; 9(4):268
356 Jian W. Mcleod C W, Anal Proc, 1991; 28(9): 293
357 Tanaka H, Yamamoto E, Morita H et al. Anal Sci, 1992; 8(1): 93
358 Okumura M, Fukushi K, Willie S N et al. Fresenius' J Anal Chem, 1993; 345(8-9): 570
359 Corns W T, Ebdon L C, Hill S J et al. J Autom Chem, 1991; 13(6): 267
360 Tanaka H, Kouno M, Morita H et al. Anal Sci, 1992; 8(6): 857
361 黄有瑞, 伊甫申, 黄雅丽. 分析化学, 1992; 20(3):335
362 Jian W, Mcleod C W. Talanta, 1992; 39(11): 1537
363 陆毅伦. 理化检验—化学分册, 1992; 28(5):294
364 Tanaka H, Morita H, Shimomura S et al. Anal Sci, 1993; 9: 859
365 Winfield S A, Boycl N D, Vimy M J et al. Clin Chem, 1994; 40: 206
366 Horvat M, Bloon N S, Liang L. Anal Chim Acta, 1993; 281: 135
367 Horvat M, Liang L, Bloon N S. Anal Chim Acta, 1993; 282: 153
368 Saouter E. Anal Chem, 1994; 66(13): 2031
369 Morales Rubio A, Mena M L, Mcleod C W. Anal Chim Acta, 1995; 308(1-3): 364
370 Pagano S T, Smith B W, Winefordner J D. Talanta, 1994; 41(2): 2073
371 Corns W T, Stockwell P B, Jameel M. Analyst, 1994; 119(11): 2481
372 Cossa D, Sanjuan J, Cloud J et al. J Anal At Spectrom, 1995; 10(3): 287
373 Ebinghaus R, Hintelmann H, Wilken R D. Fresenius' J Anal Chem, 1994; 350
374 Yoshino M, Tanaka H, Okamoto. Bunseki Kagaku, 1995; 44(9): 691
375 Stone S F, Backhaus F W, Byrne A R et al. Fresenius' J Anal Chem, 1995; 352(1-2): 184
376 Hempel M, Chau Y K, Dutka B J et al. Analyst, 1995; 120(3): 721
377 韦利杭. 分析化学, 1996; 24(2):247
378 冯家力, 潘振球, 刘红望. 分析化学, 1996; 24(1):74
379 Bryce D W, Izguierdo A, Lugue M D et al. Anal Chim Acta, 1996; 324(1): 69
380 Bloxham M J, Hill S J, Worsfold P J. J Anal At Spectrom, 1996; 11(7): 511
381 Edwarde S C, Macleod C L, Corns W T et al. Int J Environ Anal Chem, 1996; 63(3): 187
382 Greenfield S, Durrani T M, Kaya S et al. Anal Proc, 1989; 26(1): 382
383 Greenfield S, Durrani T M, Kaya S et al. Analyst, 1990; 115(5): 531
384 Epstein M S, Turk G C, Travis J D. J Anal Atom Spectrosc, 1988; 3: 523
385 Sychra V, Matousek J. Anal Chim Acta, 1970; 52: 376
386 Armentrout D N. Anal Chem, 1966; 38: 1237
387 Epstein M S, Bradshaw J, Bayer S et al. Appl Spectrosc, 1980; 34: 372
388 Marunkov A, Chekalin N, Enger J et al. Spectrochim Acta Part B, 1994; 49B(12-14): 1385
389 Bischel W K, Perry B E, Crosley D R. Appl Opt, 1982; 21: 1419
390 Rigin V I. J Anal Chem. USSR, 1983; 28: 462
391 Selwyn G S. J Appl Phys, 1986; 60: 2771
392 Döbele H F, Hoerl M, Roewekamp M et al. Appl Phys, 1986; B39: 91
393 Cavalli P, Rossi G, Omenetto N. Analyst, 1983; 108: 297
394 Sychra V, Slevin P J, Matousek J et al. Anal Chim Acta, 1970; 52: 259
395 Lonardo R F, Yuzefovsky A I, Yang K X et al. J Anal At Spectrom, 1996; 11(4): 279
396 陈云林, 李素萍. 分析化学, 1991; 19(5):557

397 Berthoud T, Mauchien P, Vian A et al. Appl Spectrosc, 1987; 41: 913
398 Johnson P A, Vera J A, Smith B W et al. Spectrosc Lett, 1988; 21: 607
399 Walters P E, Barker T E, Wensing M W et al. Spectrochim Acta Part B, 1991; 46B(6-7): 1015
400 Dagnall R M, Kirkbright G F, West T S et al. Anal Chim Acta, 1969; 47: 407
401 Zybin A V, Smirenkina I I, Yakovenko A V. Zh Anal Khim, 1991; 46(10): 2046
402 Michel R G, Ottaway J M, Sneddon J et al. Analyst, 1979; 104: 687
403 Nakahara T, Kobayashi S, Wakisaka T et al. Appl Spectrosc, 1980; 34: 194
404 Rigin V I. Zh Anal Khim, 1980; 35: 64
405 Nakahara T, Wakisaka T, Musha S. Anal Chim Acta, 1980; 118: 159
406 Dagnall R M, Thompson K C, West T S. Talanta, 1967; 14: 557
407 Gresser M S, West T S. Spectrosc Lett, 1969; 2: 9
408 Brown A A, Ottaway J M, Fell G S. Anal Chim Acta, 1985; 172: 329
409 徐宝玲，林杏彬，邱承娟. 分析化学，1988；16(10):921
410 徐立强，朱锦方，张令君等. 理化检验——化学分册，1988；24(5):278
411 郑　毅，吕江南，金泽详等. 分析化学，1989；17(10):909
412 D'ulivo A, Lampugnani L, Zamboni R. J Anal At Spectrom, 1990; 5: 225
413 马德正. 分析化学，1990；18 (1):60
414 D'ulivo A, Lampugnani L, Zamboni R. J Anal At Spectrom, 1991; 6 (7): 565
415 梁振宗，林闽生，许秀芳等. 理化检验——化学分册，1991；27(4):242
416 陈亚华，刘一真. 分析化学，1993；21(1):102
417 D'ulivo A, Lampugnani L, Zamboni R. Spectrochim Acta Part B, 1992; 47B (5): 619
418 冯先进，江银潮，符　斌. 分析试验室，1992；11(4):18
419 D'ulivo A, Lampugnani L, Zamboni R et al. Spectrohim Acta Part B, 1993; 48B (3): 387
420 汤志勇，金泽祥，刘晋华等. 理化检验——化学分册，1993；29(5):280
421 林猷璧，朱玉伦. 岩矿测试，1993；12:81
422 郭玉华，石　威，汪炳武. 光谱学与光谱分析，1993；13(5):91
423 任　萍，张　勤，张锦茂. 分析试验室，1994；13(4):65
424 Hill S J, Pitts L, Worsfold P. J Anal At Spectrom, 1995; 10 (5): 409
425 D'ulivo A, Dedina J. Spectrochim Acta Part B, 1996; 51B(5): 481
426 Bryce D W, Izguierdo A, Lugue M D et al. J Anal At Spectrom, 1995; 10(12): 1059
427 Kirkbright G F, Rao A P, West T S. Anal Lett, 1969; 2: 465
428 Dashiu S A, Maiorov I A, Bolshov MA. Spectrochim Acta Part B, 1993; 48 (4): 531
429 Dashiu S A, Maiorov I A, Bolshov M A. Zh Anal Khim, 1993; 48: 715
430 West T S, Williams X K. Anal Chem, 1968; 40: 335
431 Cheklin N, Marunkov A, Axner O. Spectrochim Acta Part B, 1994; 49B (12-14): 1411
432 Kuhl J, Marowsky G. Optics Comm, 1971; 4(2): 125
433 Brod H L, Yeung E S. Anal Chem. 1976; 48: 344
434 Mayo S, Keller R A, Travis J C et al. J Appl Phys, 1976; 47: 4012
435 Gelbwachs J A, Klein C F, Wessel J E. Appl Phys Lett, 1977: 489
436 Kuhl J, Neumann S, Kriese M. Z Naturforsch, 1973; 28a: 273
437 Coolen F C M, Hagedoorn H L. Jopt Soc Amer, 1975; 65: 952
438 Smith B, Winefordner J D, Omenetto N. J Appl Phys, 1977; 48: 2676
439 Coolen F C M, Baghuis L C J, Hagedoorn H L et al. J Opt Soc Amer, 1974; 64: 482
440 Pan C L, Prodan J V, Fairbank W M et al. Opt Lett, 1980; 5: 459
441 Shahwan G J, Heithmar E M. Spectrosc Lett, 1983; 16: 79
442 Shahwan G J, Heithmar E M. Spectrosc Lett, 1984; 17: 377
443 侯　明. 冶金分析，1990；10(4):20
444 戴建中，周春波. 理化检验——化学分册，1991；27(4):232
445 Hohimer J P, Hargis P J. Anal Chim Acta, 1978; 97: 43
446 Browner R F, Dagnall R M, West T S. Talanta, 1969; 16: 75
447 Mansfield J M, Winefordner J D, Veillon C. Anal Chem, 1965; 37: 1049
448 Dougherty J P, Costello J A, Michel R G. Anal Chem, 1988; 60: 336
449 Cheam V, Lechner J, Desrosiers R et al. Fresenius' J Anal Chem, 1996; 355(3-4): 336
450 Cheam V, Lawson G, Lechner J et al. Fresenius' J Anal Chem, 1996; 355(3-4): 332
451 Axner O, Chekalin N, Ljungberg P et al. J Environ Anal Chem, 1993; 53(3): 185
452 Hubbard D P, Michel R G. Anal Chim Acta, 1974; 72: 285
453 Tsujii K, Kuga K. Anal Chim Acta, 1978; 101: 199
454 Ebdon L, Hubbard D P, Michel R G. Anal Chim Acta, 1975; 74: 281
455 Browner R F, Dagnall R M, West T S. Anal Chim Acta, 1969; 46: 207
456 Nakahara T, Wasa T. J Anal Atom Spec, 1986; 1: 473
457 Anwar J, Anzano J M, Petrucci G A. Mikrochim, 1992; 108(3-6): 285
458 Vera J A, Murray G M, Weeks S J et al. Spectrochim Acta Part B, 1991; 46B(13): 1689
459 Sjoestroem S, Axner O, Norberg M. J Anal At Spectrom, 1993; 8 (2): 375

460 Clyburn S A, Scrio G F, Bartschmid B R et al. Anal Biochem, 1975; 63: 231
461 Dittrich K, Wennrich R, Mothes W. Chemia Analityczna, 1977; 22: 1053
462 Bratzel M P, Winefordner J D. Anal Lett, 1967; 1: 43
463 Marshall G B, Smith A C. Analyst, 1972; 97: 1155
464 Murugaiyan P, Natarajan S, Venkateswarlu Ch. Anal Chim Acta, 1975; 75: 221
465 Kolihova D, Sychra V. Chimicke Listy, 1974; 68: 1091
466 Gresser M S, West T S. Anal Chim Acta, 1970; 50: 517
467 Warr P D. Talanta, 1970; 18; 234
468 Martin T L, Hamm F M, Zeeman P B. Anal Chim Acta, 1971; 53: 437
469 Marshall G B, Smith A C. Analyst, 1972; 97: 447
470 弓振斌，王小如，应　海等. 分析试验室，1995；14(1):50
471 林跃何，王小如，黄本立. 分析试验室，1991；10(5):36
472 Rigin V I, Verkhotvrov G N, Zelentsova A M. Zh Anal Khim, 1980; 35: 1741
473 Matousek J, Sychra V. Anal Chem, 1969; 41: 518
474 Ebdon L, Kirkbright G F, West T S. Anal Chim Acta, 1969; 47: 563
475 张　锐，黄碧霞，何友昭编著. 原子光谱分析，合肥：中国科学技术大学出版社，1991
476 黄鑫泉. 化工冶金，1986；7(3)：33
477 Greenfield S. 光谱学与光谱分析，1986；6(1):1
478 王　烨. 地质实验室，1994；10(4—5):221
479 中国专利技术. 专利号：87103958. 9
480 杭州大学化学系分析化学教研室编. 分析化学手册(第三分册)电化学分析与光学分析，北京：化学工业出版社，1983
481 Smith B W, et al. Applied Spectroscopy, 1989; 43(3); 376

第三篇　X射线光谱分析

第十章　X射线光谱分析原理

X射线光谱分析(XRS)是一种重要的仪器分析方法，可以分为波长色散和能量色散两大类。波长色散X射线光谱分析的应用是从1948年第一台商品化波长色散X射线光谱仪开始。60年代中期，随着锂漂移硅探测器的发展，出现了能量色散X射线光谱分析。

X射线光谱法是一种公认的多元素分析的有效方法，它具有分析范围广，分析速度快，操作简便，可同时分析多种元素等优点，因而受到广大分析工作者的普遍重视，其应用范围正在迅速扩大。

第一节　X射线光谱分析的理论基础

一、X射线的产生与X射线光谱

在具有高度真空的X射线管内，由阴极发射的热电子在高压电场的作用下，以高速撞击金属靶(阳极)，此时电子的一部分动能转变为X光辐射能，并以X射线形式辐射出来。高速电子的动能转化为X射线的效率(ε)可用下式表示

$$\varepsilon=1.4\times10^{-9}ZV \tag{10-1}$$

式中　Z——靶金属的原子序数；

　　V——X射线管的管电压，V。

通常由X射线管所产生的X射线称为初级X射线，它是由本质上不同的两类X射线所组成，即连续X射线谱与特征X射线谱。

1. 连续X射线谱

连续X射线谱是由某一最短波长(短波限)开始的包括各种X射线波长所组成的光谱。连续X射线产生的机理可用经典的电磁理论和近代的量子理论来解释。

设X射线管的管电压为V(V)，电子由阴极飞向阳极时电场力对电子所作的功为W(eV)，即电子的动能为E_K(eV)。电子在撞击金属靶时，大多数电子的动能仅有一部分转变为X射线，其余均转化为热能(Q)，所以，其波长为

$$\lambda=\frac{hC}{E_K-Q} \tag{10-2}$$

由于热能是非量子化的，它可由0到E_K(eV)连续变化，因此连续X射线具有各种不同的波长。

电子在撞击金属靶时，只有少数电子的动能全部转变为X射线，其波长最短，这就是连续X射线谱出现短波限的原因。此时，式(10-2)为

$$\lambda_{短波限}=\frac{hC}{E_K}=\frac{1240}{V(V)}(\text{nm}) \tag{10-3}$$

连续X射线的总强度(I)，即连续X射线谱曲线下包围的总面积，可由下式表示：

$$I=1.4\times10^{-9}iZV^2 \quad (10\text{-}4)$$

式中　i——X射线管管电流，mA；

V——X射线管管电压，kV；

Z——靶金属的原子序数。

初级X射线通常作为X射线荧光分析法的激发光源，其强度大小会直接影响测定灵敏度，由式（10-4）可见，为提高连续X射线的强度，除使用尽可能大的管电压及管电流外，还应采用重金属靶。

2. 特征X射线

特征X射线是由原子内层电子被激发而产生的。因为电子的动能随X射线管电压的增大而增大，当管电压达到某一临界值（激发电势）时，高速运动电子的动能就可以把靶原子的内层电子激发出去，形成一个电子空位。此时原子便处于不稳定的激发态，外层电子会立即跃迁到能量较低的内层轨道以填补电子空位，并以X射线的形式释放能量。此X射线即为特征X射线。特征X射线的波长可由下式求得

$$\lambda=\frac{hC}{E_j-E_i}\ (\text{nm}) \quad (10\text{-}5)$$

式中　j——原子的某一外层；

i——原子的某一内层；

E_j——原子j电子层的能量；

E_i——原子i电子层的能量；

h——普朗克常数；

C——光速。

不同元素由于其原子结构不同，即各电子层能级的能量不同，它们的特征X射线的波长也就各不相同。

特征X射线的强度取决于X射线管的管电流及管电压，对K系辐射而言

$$I_K=Ci(V-V_K)^n \quad (10\text{-}6)$$

式中　C、n——常数，n约为1.5～1.7；

V_K——K系激发电位，kV。

由（10-6）式可见，为提高K系特征X射线的强度，管电压（V）应大，一般为V_K的3～5倍。

二、X射线的性质

X射线射入物质后，会发生一系列复杂现象。入射X射线的一部分能量透射过物质并产生热能，其余的能量分为两部分，一部分用来产生散射和X荧光（次级X射线），另一部分则转移给物质中的电子。

1. X射线的散射

X射线的散射可分为相干散射及非相干散射。

（1）相干散射　X射线作用于物质时，会产生波长及相位与入射X射线相同的散射X射线，这种散射作用即为相干散射。原子序数越大，原子中所含的电子数目越多，则相干散射X射线的强度就越大。

（2）非相干散射　X射线作用于物质时，所产生的散射X射线的波长及相位与入射X射线无确定关系，不能发生干涉效应，这种散射作用即为非相干散射。元素的原子序数越小，则非相干散射就越强。

表 10-1 (0.01～3) nm 元素的 X 射线

元素	波长												
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.15
1H	0.29	0.32	0.34	0.35	0.37	0.38	0.40	0.42	0.43	0.44	0.45	0.45	0.49
2He	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14	0.17	0.86	0.20	0.22	0.23	0.25	0.35
3Li	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.18	0.22	0.25	0.30	0.36	0.42	1.02
4Be	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.19	0.23	0.28	0.34	0.43	0.53	1.54
5B	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.19	0.24	0.31	0.40	0.54	0.70	0.92	2.87
6C	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.23	0.31	0.42	0.59	0.83	1.14	1.54	4.79
7N	0.14	0.15	0.16	0.17	0.20	0.28	0.40	0.59	0.88	1.26	1.76	2.37	7.38
8O	0.14	0.15	0.16	0.18	0.23	0.34	0.53	0.83	1.27	1.84	2.56	3.45	10.74
9F	0.14	0.15	0.18	0.21	0.26	0.43	0.70	1.14	1.77	2.57	3.57	4.81	14.96
10Ne	0.14	0.16	0.19	0.24	0.31	0.54	0.93	1.54	2.38	3.45	4.80	6.47	20.11
11Na	0.15	0.17	0.21	0.27	0.36	0.66	1.21	2.02	3.11	4.51	6.28	8.45	26.29
12Mg	0.15	0.18	0.23	0.31	0.43	0.83	1.54	2.57	3.97	5.76	8.02	10.79	33.56
13Al	0.15	0.19	0.26	0.36	0.50	1.03	1.93	3.22	4.96	7.21	10.03	13.50	41.97
14Si	0.15	0.20	0.29	0.42	0.59	1.27	2.38	3.97	6.11	8.88	12.35	16.63	51.69
15P	0.16	0.22	0.31	0.47	0.70	1.54	2.88	4.81	7.41	10.77	14.98	20.14	62.68
16S	0.17	0.23	0.35	0.54	0.84	1.85	3.46	5.77	8.88	12.90	17.95	24.16	75.10
17Cl	0.17	0.25	0.39	0.61	0.98	2.19	4.10	5.89	10.52	15.29	21.27	28.63	88.98
18A	0.18	0.27	0.45	0.70	1.16	2.57	4.81	8.02	12.34	17.93	24.95	33.58	104.38
19K	0.19	0.29	0.50	0.81	1.34	2.99	5.59	9.32	14.36	20.86	29.01	39.05	121.37
20Ca	0.20	0.32	0.55	0.92	1.54	3.45	6.44	10.74	16.54	24.04	33.43	44.99	139.85
21Sc	0.21	0.36	0.61	1.06	1.77	3.95	7.37	12.29	18.93	27.50	38.25	51.49	160.03
22Ti	0.22	0.38	0.69	1.20	2.01	4.49	8.38	13.98	21.53	31.27	43.50	58.55	181.98
23V	0.23	0.40	0.76	1.36	2.27	5.07	9.47	15.79	24.31	35.31	49.12	66.11	205.47
24Cr	0.24	0.43	0.83	1.53	2.55	5.70	10.63	17.73	27.30	39.66	55.16	74.25	230.78
25Mn	0.25	0.46	0.92	1.71	2.85	6.37	11.89	19.82	30.52	44.33	61.66	83.00	257.97
26Fe	0.26	0.50	1.02	1.90	3.17	7.09	13.23	22.06	33.96	49.34	68.62	92.36	287.08
27Co	0.28	0.56	1.13	2.11	3.52	7.86	14.66	24.45	37.64	54.68	76.06	102.37	318.19
28Ni	0.30	0.61	1.25	2.33	3.88	8.68	16.19	27.00	41.57	60.38	83.99	113.04	43.84
29Cu	0.32	0.68	1.38	2.56	4.27	9.55	17.82	29.71	45.74	66.45	92.42	120.48	48.58
30Zn	0.35	0.72	1.51	2.81	4.69	10.47	19.54	32.58	50.17	72.88	101.37	136.44	53.65
31Ga	0.37	0.76	1.73	3.08	5.13	11.46	21.39	35.66	54.91	79.76	110.94	149.32	59.31
32Ge	0.40	0.82	1.81	3.35	5.59	12.49	23.31	38.87	59.84	86.93	120.91	162.75	65.10
33As	0.42	0.88	1.96	3.65	6.08	13.59	25.36	42.28	65.09	94.56	131.52	177.03	71.02
34Se	0.47	0.96	2.13	3.96	6.60	14.75	27.51	45.87	70.63	102.61	142.71	25.02	77.85
35Br	0.50	1.04	2.31	4.29	7.15	15.97	29.78	49.66	76.46	111.07	154.49	27.29	84.93
36Kr	0.53	1.12	2.49	4.63	7.72	17.25	32.18	53.65	82.60	120.00	22.05	29.69	92.27
37Rb	0.57	1.21	2.69	4.99	8.32	18.59	34.68	57.82	89.03	129.33	23.99	32.29	100.38
38Sr	0.61	1.30	2.89	5.37	8.96	20.00	37.32	62.22	95.80	18.71	26.03	35.03	108.89
39Y	0.65	1.40	3.11	5.77	9.62	21.48	40.08	66.82	102.88	20.24	28.16	37.90	117.80
40Zr	0.69	1.50	3.33	6.19	10.31	23.03	42.96	71.63	15.06	21.88	30.43	40.96	127.33
41Nb	0.74	1.60	3.57	6.62	11.03	24.65	45.98	76.66	16.19	23.52	32.72	44.04	136.88
42Mo	0.79	1.71	3.81	7.07	11.79	26.33	49.12	81.90	17.38	25.25	35.12	47.28	146.95
43Tc	0.84	1.83	4.07	7.55	12.58	28.09	52.41	12.12	18.66	27.11	37.70	50.75	157.73
44Ru	0.89	1.95	4.33	8.04	13.40	29.93	55.83	12.97	19.97	29.02	40.36	54.33	168.86
45Rh	0.94	2.07	4.61	8.55	14.26	31.84	59.39	13.87	21.36	31.03	43.16	58.10	180.58
46Pd	1.00	2.20	4.90	9.09	15.14	33.82	63.18	14.81	22.80	33.12	46.07	62.01	192.75
47Ag	1.05	2.34	5.19	9.64	16.07	35.89	9.4	15.7	24.3	35.3	49.1	66.1	205
48Cd	1.10	2.48	5.51	10.22	17.03	38.04	10.0	16.8	25.8	37.5	52.2	70.3	218
49In	1.15	2.62	5.83	10.82	18.03	40.27	10.7	17.8	27.5	39.9	55.5	74.7	232
50Sn	1.20	2.77	6.16	11.44	19.06	42.58	11.9	19.9	30.7	44.7	62.1	79.5	260
51Sb	1.25	2.93	6.51	12.08	20.14	44.97	12.0	20.1	30.9	45.0	62.5	84.2	261
52Te	1.30	3.09	6.87	12.75	21.25	6.85	12.7	21.3	32.7	47.6	66.2	89.1	277

K

质量吸收系数[1]

λ/nm						ν								
0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	
0.52	0.62	0.75	1.25	2.12	3.28	4.85	7.1	10.0	13.7	32	69	127	208	
0.71	1.04	1.48	3.55	6.90	11.60	18.1	26.6	37.7	51	107	268	540	970	
2.18	3.98	6.60	15.2	28.80	4880	76	113.0	157	213	402	970	1900	3270	
3.45	6.44	10.74	24.04	44.91	74.84	115.2	167.4	232	312	973	2178	4068	6778	
6.43	12.01	20.03	44.80	83.69	139.4	214.7	312.0	434	583	1814	4059	7583	12633	
10.72	20.01	33.35	74.61	139.3	232.2	357.5	519.6	722	970	3020	6760	12627	21037	
16.51	30.83	51.38	114.9	214.6	357.7	550.7	800.4	1113	1495	4652	10413	19450	32407	K
24.02	44.85	74.75	167.1	312.3	520.4	801.2	1164.5	1619	2175	6768	15149	1005	1675	
33.45	62.45	104.0	232.8	434.8	724.7	1115.6	1621.4	2254	3029	9425	932	1741	2900	
44.98	83.98	139.9	313.0	584.8	974.5	1500.3	2180.5	3032	4073	659	1475	2756	4593	
58.79	109.75	182.9	409.1	764.2	1273.5	1960.6	2849.5	3962	5323	951	2130	3979	6629	
75.05	140.11	233.5	522.3	975.6	1625.9	2503.0	3637.8	5059	467	1453	3252	6075	10122	
93.86	175.22	292.0	653.2	1220.1	2033.3	3130.3	336.1	467	628	1954	4373	8168	13608	
115.58	215.78	359.6	804.4	1502.5	2503.9	305.3	443.8	617	829	2579	5773	10784	17966	
140.16	261.66	436.1	975.4	1822.0	251.1	386.6	561.9	781	1049	3266	7310	13655	22750	
167.92	313.48	522.4	1168.6	2182.9	310.7	478.4	695.3	966	1298	4041	9044	16894	28146	
198.97	371.45	619.0	1384.7	225.1	375.2	577.6	839.5	1167	1568	4880	10921	20400	33987	
233.39	435.70	726.1	156.2	291.9	486.5	748.9	1092	1510	2033	6327	14160	26450	44066	
271.38	506.63	844.4	190.8	356.4	594.0	914.5	1329	1848	2483	7725	17289	32295	53804	
312.71	583.78	972.9	232.7	434.7	724.4	1115	1620	2254	3028	9422	21086	39387	65624	L Ⅰ
357.84	668.03	121.9	272.6	509.3	848.8	1306	1899	2641	3547	11039	24705	46146	65378	L Ⅱ
406.91	85.71	142.7	319.3	596.6	994.2	1530	2224	3093	4155	12930	28939	45874	8845	L Ⅲ
459.45	104.07	173.4	387.9	724.7	1207	1859	2702	3757	5048	15707	28265	5960	9930	
516.03	117.54	195.9	438.1	818.5	1364	2099	3051	4244	5701	17740	32301	6897	11490	
70.76	132.11	220.1	492.5	919.9	1533	2360	3430	4770	6408	19938	4155	7761	12930	
79.21	147.88	246.4	551.3	1029	1716	2641	3839	5339	7173	18597	4656	8698	14490	
88.41	165.04	275.0	615.2	1149	1915	2948	4285	5959	8005	20828	5184	9684	16134	
98.04	183.02	305.0	682.3	1274	2123	3269	4752	6608	8877	2623	5872	10968	18273	
108.64	202.82	338.0	756.1	1412	2353	3623	5266	7323	9838	2918	6531	12199	20325	
119.96	223.95	373.2	834.8	1559	2598	4000	5814	8086	10862	3234	7237	13519	22523	
132.61	247.57	412.6	922.9	1723	2872	4422	6428	8939	10315	3584	8021	14982	24961	
145.58	271.78	452.9	1013	1892	3153	4855	7056	8535	11079	3984	8916	16654	27746	
158.81	296.47	494.1	1105	2064	3440	5296	7697	9389	1409	4386	9816	18336	30549	
174.08	324.98	541.6	1211	2263	3771	5805	7397	10287	1548	4818	10783	20141	33556	
189.90	354.52	590.8	1321	2468	4113	5574	994	1383	1858	5781	12938	24166	40262	
206.33	385.19	641.9	1435	2682	4469	6090	1122	1561	2088	6525	14604	27279	45447	
224.45	419.02	698.3	1562	2917	4315	877	1275	1774	2383	7416	16598	31004	51652	
243.49	454.57	757.6	1694	3165	4699	971	1412	1963	2638	8208	18371	34315	57169	
263.41	491.75	819.5	1833	3424	704	1084	1575	2191	2943	9159	20498	38289	62686	M Ⅰ
284.71	531.50	885.8	1981	3313	790	1217	1769	2460	3305	10286	23020	42998	55280	
306.07	571.37	952.3	2130	3579	860	1324	1925	2678	3597	11193	25050	46791	60946	
328.59	613.43	1022	2286	568	946	1456	2117	2944	3955	12307	27543	39976	66612	M Ⅱ
352.68	658.40	1097	2454	624	1040	1602	2328	3238	4350	13535	30293	44632	39444	M Ⅲ
378.03	704.85	1174	2385	678	1131	1741	2531	3520	4728	14713	32929	48987	44717	
403.77	753.78	1256	2423	739	1233	1898	2758	3836	5154	16036	29040	30192	50304	
431.00	804.61	1134	430	804	1340	2063	2999	4170	5603	17433	31764	33872	56432	
459	857	1429	467	873	1455	2240	3255	4527	6082	18924	34727	37812	52996	M Ⅳ
489	913	1522	502	937	1562	2406	3497	4863	6533	20327	22293	41641	18612	
519	970	1485	546	1020	1700	2618	3805	5291	7108	19536	24793	46311	20439	M Ⅴ
581	1086	1480	588	1098	1831	2819	4097	5736	7654	20067	27429	12951	21578	
585	1093	282	632	1181	1969	3031	4405	6126	8230	21593	29983	14367	23935	
619	1157	302	677	1265	2109	3247	4719	6563	8816	21580	32605	15196	25317	

L Ⅰ　L Ⅱ L Ⅲ　M ⅣM Ⅰ　M Ⅱ　M ⅣM Ⅴ

元素	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.15 波长
53I	1.36	3.26	7.24	13.44	22.40	7.24	13.5	22.5	34.6	50.4	70.1	94.3	293
54Xe	1.42	3.43	7.63	14.16	23.59	7.66	14.2	23.8	36.6	53.3	74.1	99.7	310
55Cs	1.48	3.61	8.03	14.90	24.82	8.08	15.0	25.1	38.7	56.2	78.2	105.3	327
56Ba	1.53	3.80	8.44	15.66	26.10	8.52	15.9	26.5	40.8	59.3	82.5	111.0	345
57La	1.60	3.99	8.86	16.45	27.42	8.98	16.7	27.9	42.9	62.4	86.8	116.9	363
58Ce	1.66	4.19	9.30	17.27	28.78	9.45	17.6	29.4	45.2	65.7	91.4	123.1	382
59Pr	1.72	4.39	9.76	18.11	4.45	9.94	18.5	30.9	47.5	69.1	96.1	129.4	402
60Nd	1.80	4.60	10.23	18.98	4.67	10.4	19.4	32.4	49.9	72.6	101.0	135.9	422
61Pm	1.86	4.82	10.71	19.88	4.90	10.9	20.4	34.0	52.4	76.2	106.0	142.7	443
62Sm	1.93	5.04	11.21	20.80	5.14	11.4	21.4	35.7	55.0	79.9	111.2	149.7	465
63Eu	2.02	5.28	11.73	21.76	5.39	12.0	22.4	37.4	57.7	83.8	116.5	156.9	487
64Gd	2.09	5.52	12.26	3.38	5.64	12.6	23.5	39.2	60.3	87.6	122.0	164.2	478
65Tb	2.18	5.76	12.80	3.54	5.91	13.2	24.6	41.0	63.2	91.8	127.7	171.7	501
66Dy	2.26	6.02	13.37	3.70	6.18	13.8	25.7	42.9	66.0	95.9	133.5	179.6	469
67Ho	2.33	6.28	13.95	3.87	6.46	14.4	26.9	44.8	69.0	100.3	139.5	187.8	489
68Er	2.42	6.55	14.55	4.05	6.75	15.0	28.1	46.8	72.1	104.8	145.8	196.3	107
69Tm	2.50	6.82	15.16	4.23	7.05	15.7	29.3	48.9	75.4	109.5	152.3	205.1	113
70Yb	2.58	7.11	15.90	4.42	7.36	16.4	30.6	51.1	78.7	114.4	159.1	214.1	118
71Lu	2.66	7.40	2.48	4.61	7.68	17.1	32.0	53.3	82.1	119.3	166.0	223.5	124
72Hf	2.75	7.71	2.59	4.80	8.01	17.8	33.3	55.6	85.6	124.4	173.0	232.9	131
73Ta	2.82	8.02	2.70	5.01	8.35	18.6	34.7	57.9	89.3	129.7	180.4	242.8	136
74W	2.90	8.34	2.81	5.22	8.70	19.4	36.2	60.4	93.0	135.[illegible]	188.0	253.0	143
75Re	2.96	8.67	2.93	5.44	9.06	20.2	37.7	62.9	96.9	140.8	195.8	249.4	150
76Os	3.03	9.00	3.05	5.66	9.44	21.0	39.3	65.5	100.9	146.6	204.0	260.1	157
77Ir	3.10	9.35	3.17	5.89	9.82	21.9	40.9	68.2	105.0	152.5	212.2	231.5	165
78Pt	3.17	9.71	3.30	6.13	10.2	22.8	42.5	70.9	109.2	158.7	210.1	240.0	172
79Au	3.23	10.08	3.43	6.37	10.6	23.7	44.2	73.8	113.6	165.1	218.2	249.0	177
80Hg	3.30	1.60	3.57	6.62	11.0	24.6	46.0	76.7	118.1	171.5	191.6	257.9	189
81Tl	3.36	1.67	3.71	6.89	11.4	25.6	47.8	79.7	122.8	178.4	198.3	63.5	197
82Pb	3.41	1.73	3.86	7.16	11.9	26.6	49.7	82.9	127.7	176.5	205.3	66.6	207
83Bi	3.45	1.80	4.01	7.44	12.4	27.7	51.6	86.1	132.6	152.7	212.3	69.6	216
84Po	3.52	1.87	4.17	7.73	12.8	28.7	53.7	89.5	137.8	157.8	54.1	72.7	225
85At	3.56	1.94	4.33	8.03	13.3	29.8	55.7	92.9	143.1	163.1	57.1	76.8	238
86Rn	3.61	2.02	4.49	8.33	13.8	31.0	57.8	96.4	141.6	168.5	59.7	80.4	250
87Fr	3.66	2.09	4.65	8.64	14.4	32.1	60.0	100.0	119.8	174.0	62.1	83.6	260
88Ra	3.70	2.17	4.83	8.96	14.9	33.3	62.2	103.7	123.6	179.6	64.2	86.4	268
89Ac	3.75	2.25	5.00	9.29	15.4	34.5	64.5	107.5	127.6	48.5	67.4	90.8	282
90Th	3.81	2.33	5.19	9.63	16.0	35.8	66.8	111.4	131.6	50.2	69.9	94.1	292
91Pa	3.86	2.42	5.39	9.98	16.6	37.1	69.3	110.5	135.7	52.3	72.7	97.9	304
92U	3.91	2.51	5.58	10.35	17.4	38.5	71.8	90.8	139.9	54.3	75.5	101.5	316
93Np	3.95	2.58	5.66	10.7	18	40	83	93	143.0	57	77	104	328
94Pu	4.00	2.66	5.74	11.0	19	41	85	96	39.1	59	79	107	342
95Am	4.05	2.74	5.82	11.4	20	43	87	99	41	61	81	110	354
96Cm	2.50	2.82	5.90	11.8	21	44	89	101	43	63	84	113	367
97Bk	2.56	2.90	5.97	12.3	21	45	91	104	46	65	86	117	382
98Cf	2.62	2.96	6.03	12.8	22	47	89	106	48	67	89	121	395
99Es	2.68	3.03	6.09	13.3	22	50	71	110	50	69	92	125	412
100Fm	2.74	3.10	6.15	13.7	23	51	73	35	52	71	95	128	427

K　L I　L II　L III

续表

	λ/nm														
	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	
		L I	L II L III							M I M II		M III	M IV M V		
	655	1132	324	725	1355	2258	3477	5053	7027	9440	15831	34719	16259	27088	
	693	1110	351	786	1469	2448	3769	5478	7619	10235	17221	9323	17414	29012	
	731	222	370	827	1546	2576	3966	5764	8016	10769	18564	9873	18442	30725	
L I	771	236	394	882	1648	2746	4228	6144	8545	9855	20012	10461	19540	32554	
	755	250	417	934	1745	2908	4478	6508	9051	10506	21612	11061	20661	34422	
L II	765	266	444	992	1854	3090	4758	6915	8338	10195	5564	12454	23262	38755	
	766	283	471	1055	1971	3284	5056	7349	8853	10887	5960	13339	24916	41511	
L III	805	298	497	1111	2076	3460	5327	7743	9382	8404	6263	14016	26181	43619	
	171	320	533	1193	2230	3716	5721	7134	9150	8913	6631	14841	27721	46184	
	177	331	551	1234	2305	3842	5915	7546	7048	9466	7000	15667	29264	48754	
	186	349	581	1301	2430	4050	6236	7194	7478	10044	7460	16695	31184	51954	
	197	367	613	1371	2561	4269	5769	7606	7910	10627	7943	17778	33207	55323	
	208	388	647	1448	2704	4507	6112	6022	8374	10887	8453	18918	35336	58871	
	218	407	679	1519	2838	4730	5723	6357	8840	2890	8994	20130	37600	62642	
	229	427	712	1594	2977	4369	6022	6707	9327	3073	9561	21399	39971	66597	N I
	239	446	744	1665	3110	4603	4873	7082	2433	3268	10169	22759	42512	54286	
	252	472	787	1760	3288	4300	5141	7472	2585	3472	10804	24179	45164	57823	
	265	495	825	1847	3450	4537	5417	7632	2745	3687	11474	25679	47966	61517	
	278	520	866	1938	3240	4747	5701	2095	2914	3914	12180	27258	39587	65211	N II
	293	547	912	2041	3415	3917	6032	2224	3093	4155	12929	28936	42537	59733	
	306	571	952	2130	3571	4092	6124	2361	3284	4411	13726	30721	45622	63626	N III
	321	599	999	2236	3258	4309	1727	2511	3492	4691	14597	32670	48933	37825	
	336	628	1046	2341	3406	4530	1837	2670	3713	4988	15520	34735	43618	41124	
	352	658	1097	2455	3562	4767	1951	2836	3944	5299	16488	29811	46504	44644	
	369	689	1149	2324	3004	4786	2077	3019	4199	5640	17551	31973	49560	48379	
	386	721	1202	2444	3144	1433	2207	3208	4461	5993	18647	34038	31491	52468	
	397	742	1237	2172	3314	1525	2348	3413	4747	6377	19843	29965	34034	56784	
	423	791	1318	2268	3458	1623	2498	3631	5050	6784	21110	31981	36864	61416	
	442	826	1377	2370	3455	1723	2652	3855	5362	7110	18501	33997	39791	66048	N IV
	463	865	1442	2027	1098	1829	2817	4094	5693	7648	19714	22997	42956	21595	N V
	484	905	1508	2126	1166	1943	2992	4348	6047	8124	20961	24795	46314	23810	
	505	943	1447	2222	1238	2063	3176	4616	6420	8625	17953	26718	49906	26221	
	534	997	1510	2322	1310	2184	3362	4887	6796	9130	19300	28660	17312	28844	
	559	1043	1305	2424	1386	2310	3557	5170	7190	9659	20448	30902	19023	31694	
	581	1085	1356	2328	1464	2440	3757	5460	7593	10201	21674	33017	20880	34787	
	600	1121	1410	2497	1544	2573	3961	5758	8007	10757	15740	33026	24647	41063	
	631	1005	1459	872	1630	2716	4181	6077	8452	9673	16748	14827	27696	46142	
	654	1121	1520	923	1724	2873	4424	6429	8942	10250	17797	16640	31082	51783	
	680	947	1331	964	1801	3001	4620	6715	9339	10852	18837	17647	32963	54918	
	707	981	1381	1019	1903	3172	4883	7098	8406	9091	19924	19373	36188	60289	
	729	1000	1435	1070	2020	3360	5170	7450	N I	N II	N III	N IV N V			
	755	1021	1470	1120	2140	3750	5460								
	785	1042	1400	1170	2260	3960	5750								
	530	1063	1450	1220	2370	4180	6080								
	420	910	510	1270	2490	4420	6430								
	435	930	525	1320	2620	4620									
	452	950	540	1370	2750	4880									
	470	980	555	1420	2880	5100									
	M I M II	M III	M IV M V												

2. X射线的衍射

X射线的衍射起因于相干散射线的干涉作用。当X射线投射到晶体上时，各原子对入射X射线发生相干散射，这些很大数目的原子所产生的相干散射会发生干涉现象，干涉的结果可以使散射的X射线的强度增强或减弱。根据光的干涉原理，只有当光程差为波长的整数倍时，光波的振幅才能互相叠加使光的强度增强，这种现象即为X射线的衍射。发生相长干涉产生的X射线称为X射线的衍射线。

发生相长干涉，产生X射线衍射线的条件是

$$n\lambda=2d\sin\theta \tag{10-7}$$

式中，n为衍射级次，可以是0，1，2等整数，分别称为0级，1级，2级衍射等；d为两个相邻平行晶面的间距，称为晶面间距；θ为掠射角，即入射或衍射X射线与晶面间的夹角。

这就是著名的布拉格公式。根据布拉格公式，用已知波长(λ)的X射线来测量θ角，从而计算出晶面间距(d)，这就是X射线结构分析；若用已知d的晶体来测量θ角，从而计算出特征辐射的波长(λ)，并从波长(λ)进一步查出样品中所含的元素，这就是X射线光谱分析。

3. X射线的吸收

物质对X射线的吸收可以有两种情况。一种是散射吸收，它主要是由非相干散射引起；另一种是真吸收，是由入射X射线引起物质原子内层电子的激发而产生的吸收。大多数元素的吸收都是以真吸收为主，散射吸收较少可以忽略。

物质对X射线的吸收遵守吸收定律，即

$$I=I_0e^{-\mu_L X} \tag{10-8}$$

式中 I——透射X射线强度；

I_0——入射X射线强度；

X——物质的厚度，cm；

μ_L——线吸收系数，cm^{-1}。

(1) 质量吸收系数　质量吸收系数 ($\mu_m/cm^2 \cdot g^{-1}$) 被定义为

$$\mu_m=\mu_L/\rho \tag{10-9}$$

式中ρ为物质的密度，单位为$g \cdot cm^{-3}$。

多元素混合体（如混合物、化合物、合金等）的总质量吸收系数为

$$\mu_m=\sum_{i=1}^{n}x_i\mu_{m_i} \tag{10-10}$$

式中 x_i——元素占混合体的质量分数；

μ_{m_i}——i元素的质量吸收系数。

μ_m与入射X射线的波长(λ)和吸收体的原子序数(Z)有关，而与吸收体存在的物理状态无关，即

$$\mu_m=K\lambda^3Z^3 \tag{10-11}$$

式中K为常数，由(10-11)式可见，入射X射线波长越长，吸收体的原子序数越大，则X射线越易被吸收，质量吸收系数用得很广泛，它是化学元素的一种原子属性，与物质的化学状态及物理状态无关。

表10-1是(0.01～3) nm元素的X射线质量吸收系数，表10-2、表10-3、表10-4、表10-5、表10-6和表10-7依次为质量吸收系数(K_{α_1}线，K_{β_1}线，L_{α_1}线，L_{β_1}线，M_α线和M_β线)，表10-8为有机薄膜和混合气体的质量吸收系数。

表 10-2 质量吸收系数（$K_{\alpha 1}$ 线）[2]

发射源	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti	Al
λ/nm	0.0559	0.0585	0.0613	0.0709	0.154	0.166	0.179	0.194	0.229	0.275	0.834
E/keV 吸收体	22.2	21.2	20.2	17.5	8.05	7.48	6.93	6.40	5.41	4.51	1.49
H	0.000174	0.000204	0.000239	0.000398	0.00572	0.00736	0.00953	0.0125	0.0220	0.0410	1.79
He	0.00175	0.00204	0.00238	0.00390	0.0528	0.0676	0.0873	0.114	0.202	0.377	16.9
Li	0.00849	0.00990	0.0116	0.0189	0.251	0.321	0.413	0.536	0.935	1.72	66.5
Be	0.0278	0.0323	0.0378	0.0613	0.787	1.00	1.28	1.66	2.86	5.20	183
B	0.0670	0.0780	0.0912	0.149	1.97	2.50	3.20	4.12	7.05	12.6	383
C	0.143	0.167	0.195	0.317	4.13	5.22	6.66	8.55	14.5	25.7	710
N	0.256	0.298	0.347	0.560	6.94	8.76	11.1	14.3	24.0	42.2	1120
O	0.417	0.483	0.562	0.902	10.9	13.7	17.3	22.1	37.1	64.7	1570
F	0.607	0.703	0.817	1.31	15.2	19.0	24.0	30.6	50.8	87.8	2030
Ne	0.924	1.07	1.24	1.97	22.2	27.8	35.0	44.3	73.1	125	2770
Na	1.24	1.43	1.65	2.61	28.2	35.2	44.2	55.9	92.1	157	3400
Mg	1.74	2.00	2.31	3.63	37.9	47.1	58.9	74.4	122	206	4160
Al	2.24	2.58	2.98	4.66	47.5	58.9	73.6	92.6	150	254	410
Si	2.95	3.39	3.91	6.08	61.1	75.7	94.4	119	192	322	550
P	3.60	4.13	4.76	7.39	72.7	89.9	112	140	226	377	667
S	4.57	5.24	6.04	9.35	90.1	111	138	173	277	458	875
Cl	5.32	6.11	7.02	10.8	103	127	157	196	313	515	979
Ar	5.98	6.86	7.88	12.1	114	140	173	216	342	559	1120
K	7.62	8.73	10.0	15.4	142	174	215	267	421	684	1420
Ca	9.17	10.5	12.0	18.4	167	204	252	312	490	791	1710
Sc	9.82	11.2	12.9	19.8	180	221	271	335	518	816	1850
Ti	11.1	12.7	14.6	22.3	200	244	299	369	566	106	2100
V	12.5	14.3	16.4	25.0	220	267	326	400	72.5	120	2330
Cr	14.5	16.6	19.0	28.9	249	302	367	448	84.1	138	2810
Mn	16.1	18.4	21.0	32.0	270	325	394	59.6	93.4	153	3030
Fe	18.5	21.0	24.1	36.5	300	361	54.8	68.0	108	178	3440
Co	20.3	23.1	26.4	39.9	321	49.3	60.6	75.1	119	197	3800
Ni	23.4	26.6	30.4	45.8	46.5	57.4	71.1	88.7	141	231	4270
Cu	24.7	28.1	32.0	48.1	49.5	60.9	75.4	93.6	149	245	4510
Zn	27.2	31.0	35.3	53.0	55.4	68.0	84.1	105	166	273	4940
Ga	29.0	33.0	37.5	56.1	59.4	73.0	90.1	112	177	291	5230
Ge	31.3	35.5	40.4	60.3	64.7	79.3	97.8	122	193	317	5600
As	34.0	38.6	43.9	65.3	71.1	87.1	107	134	211	347	5260
Se	35.8	40.5	46.0	68.1	76.1	93.2	115	143	226	372	5470
Br	39.3	44.6	50.6	74.7	84.5	103	127	158	250	411	9930
Kr	41.6	47.0	53.5	78.6	89.9	110	136	169	268	441	1140
Rb	44.9	50.8	57.5	84.2	98.6	121	149	185	294	483	1260
Sr	48.1	54.4	61.6	89.9	109	133	163	203	319	522	1360
Y	51.9	58.6	66.2	96.0	119	146	179	223	351	574	1510
Zr	55.2	62.2	70.2	15.1	128	157	193	239	377	614	1640
Nb	58.8	66.3	74.7	16.2	139	170	209	259	408	665	1820
Mo	61.9	69.7	78.6	17.4	149	182	224	277	435	706	1960
Tc	64.7	72.7	12.4	18.6	158	193	237	294	460	745	2110
Ru	67.9	11.7	13.3	20.0	170	208	256	316	495	796	2330
Rh	11.2	12.7	14.4	21.6	183	223	274	338	529	853	2470
Pd	11.8	13.4	15.2	22.7	194	237	291	360	561	893	2660
Ag	12.7	14.4	16.4	24.6	208	254	311	384	598	954	2900
Cd	13.3	15.1	17.2	25.7	216	263	323	398	620	991	3250
In	14.2	16.1	18.3	27.4	229	279	342	422	654	1040	3220
Sn	14.8	16.8	19.2	28.7	243	295	361	444	681	1060	3330
Sb	15.8	17.9	20.4	30.5	253	308	377	464	716	990	3660
Te	16.2	18.4	20.9	31.4	262	319	389	477	729	740	3840
I	17.8	20.0	22.9	34.1	282	343	419	515	792	257	3920
Xe	18.5	21.0	23.9	35.6	294	356	435	533	707	269	4010
Cs	19.8	22.4	25.5	38.1	313	379	461	563	755	291	4330
Ba	20.6	23.4	26.6	39.9	327	394	478	582	575	310	4420
La	22.0	24.9	28.3	42.3	343	414	503	613	199	330	4590
Ce	23.4	26.5	30.2	45.0	362	435	525	566	217	351	5140
Pr	25.0	28.4	32.3	48.3	382	459	552	434	232	367	5180
Nd	26.1	29.6	33.7	50.4	397	476	506	459	243	384	5270
Pm	27.8	31.5	35.6	53.0	422	511	391	168	258	409	5670
Sm	28.7	32.6	37.0	55.2	425	451	406	173	266	421	5480

续表

发射源	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti	Al
λ/nm	0.0559	0.0585	0.0613	0.0709	0.154	0.166	0.179	0.194	0.229	0.275	0.834
E/keV 吸收体	22.2	21.2	20.2	17.5	8.05	7.48	6.93	6.40	5.41	4.51	1.49
Eu	30.3	34.4	39.0	58.1	389	346	150	183	280	444	5770
Gd	31.2	35.4	40.1	59.7	403	357	155	190	291	459	5160
Tb	33.0	37.4	42.4	63.0	303	134	163	199	304	481	5430
Dy	34.3	38.8	44.1	65.3	319	139	169	206	315	499	5660
Ho	36.0	40.8	46.3	68.6	120	145	176	215	330	523	5970
Er	37.9	42.9	48.7	72.1	126	152	185	226	346	548	6230
Tm	39.6	44.8	50.8	75.1	132	160	194	238	364	575	4310
Yb	40.9	46.2	52.3	77.3	137	166	201	246	376	593	1340
Lu	43.1	48.8	55.3	81.5	143	173	210	257	393	620	1410
Hf	44.1	49.9	56.6	83.5	149	181	219	268	407	639	1480
Ta	46.5	52.5	59.4	87.3	154	186	226	276	423	670	1560
W	47.8	54.0	61.1	89.9	160	193	235	287	440	696	1640
Re	50.1	56.7	64.1	94.0	166	201	244	299	458	724	1720
Os	51.5	58.1	65.8	96.5	172	208	253	309	472	746	1790
Ir	53.8	60.6	68.6	100	179	216	263	322	494	781	1890
Pt	56.4	63.6	71.8	104	186	225	273	334	510	806	1980
Au	58.1	65.6	74.1	108	194	234	284	348	532	841	2080
Hg	60.5	68.1	76.9	112	200	241	293	359	550	868	2180
Tl	61.8	69.7	78.6	114	207	250	304	372	568	893	2270
Pb	63.9	71.9	81.1	118	215	259	314	383	585	920	2360
Bi	66.3	74.7	84.1	121	223	269	327	400	609	952	2480
Po	69.4	77.9	87.5	125	233	281	341	417	634	992	2620
At	72.2	81.2	91.3	115	244	295	358	437	666	1040	2750
Rn	71.1	79.8	89.6	113	243	293	355	433	658	1030	2730
Fr	73.8	82.8	93.1	83.6	253	304	369	451	686	1030	2850
Ra	76.0	85.3	96.0	86.3	261	315	382	466	708	1060	2960
Ac	78.7	88.0	98.6	90.0	272	328	398	486	735	1040	3120
Th	80.6	90.3	88.3	92.1	279	336	408	497	753	1070	3150
Pa	82.6	92.2	65.2	96.9	292	352	427	521	785	1120	3280
U	83.8	82.6	66.0	97.6	295	355	430	524	760	1130	3330
NP	76.9	60.9	69.0	42.6	309	372	451	548	798	1190	3380
Pu	55.2	62.5	70.8	43.5	315	380	460	559	769	1040	3540

表 10-3 质量吸收系数（$K_{\beta 1}$ 线）

发射源	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti	Al
λ/nm	0.0497	0.0521	0.0546	0.0632	0.139	0.150	0.162	0.176	0.208	0.251	0.796
E/keV 吸收体	24.9	23.8	22.7	19.6	8.91	8.26	7.65	7.06	5.95	4.93	1.56
H	0.000115	0.000135	0.000159	0.000266	0.00406	0.00524	0.00681	0.00895	0.0160	0.0303	1.53
He	0.00118	0.00137	0.00161	0.00264	0.0376	0.0482	0.0672	0.0822	0.147	0.277	14.5
Li	0.00571	0.00667	0.00781	0.0128	0.180	0.230	0.297	0.388	0.685	1.27	57.4
Be	0.0188	0.0219	0.0256	0.0417	0.565	0.722	0.929	1.21	2.11	3.89	159
B	0.0451	0.0526	0.0616	0.101	1.42	1.81	2.32	3.00	5.22	9.48	333
C	0.0969	0.113	0.132	0.216	2.97	3.79	4.86	6.27	10.8	19.5	620
N	0.174	0.202	0.236	0.383	5.02	6.38	8.15	10.5	18.0	32.1	983
O	0.284	0.329	0.384	0.619	7.89	9.98	12.7	16.4	27.8	49.3	1380
F	0.415	0.481	0.560	0.902	11.1	14.0	17.7	22.7	38.3	67.3	1790
Ne	0.633	0.734	0.853	1.37	16.3	20.5	25.9	33.1	55.4	96.5	2450
Na	0.854	0.988	1.15	1.82	20.8	26.0	32.9	41.8	69.7	121	3030
Mg	1.20	1.39	1.61	2.54	28.0	35.0	44.0	55.8	92.4	159	3720
Al	1.55	1.79	2.07	3.28	35.3	44.0	55.2	69.8	115	197	357
Si	2.05	2.36	2.73	4.29	45.5	56.6	70.8	89.6	147	250	484
P	2.50	2.89	3.33	5.22	54.2	67.4	84.2	106	173	294	590
S	3.19	3.67	4.23	6.62	67.5	83.6	104	131	213	359	775
Cl	3.72	4.27	4.94	7.70	77.2	93.5	119	149	24[illegible]	404	868
Ar	4.19	4.81	5.55	8.63	85.3	106	131	164	264	440	990
K	5.35	6.14	7.07	11.0	107	132	164	204	327	541	1260
Ca	6.44	7.40	8.51	13.2	126	155	192	240	38[illegible]	627	1510

续表

发射源	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti	Al
λ/nm	0.0497	0.0521	0.0546	0.0632	0.139	0.150	0.162	0.176	0.208	0.251	0.796
E/keV 吸收体	24.9	23.8	22.7	19.6	8.91	8.26	7.65	7.06	5.95	4.93	1.56
Sc	6.91	7.93	9.11	14.1	136	168	207	258	407	656	1640
Ti	7.83	8.98	10.3	15.9	152	186	230	285	446	83.2	1860
V	8.83	10.1	11.6	17.9	167	205	252	311	481	93.8	2060
Cr	10.3	11.8	13.5	20.7	191	233	285	351	65.4	108	2490
Mn	11.4	13.1	15.0	23.0	207	252	307	376	72.6	120	2690
Fe	13.1	15.0	17.2	26.3	232	281	341	52.1	83.3	139	3060
Co	14.4	16.5	18.9	28.8	249	300	46.3	57.6	92.0	154	3390
Ni	16.6	19.0	21.7	33.1	279	43.1	53.8	67.6	109	181	3800
Cu	17.6	20.0	23.0	34.9	37.0	45.9	57.1	71.6	115	192	4020
Zn	19.5	22.2	25.4	38.4	41.6	51.4	63.9	79.9	128	214	4420
Ga	20.8	23.7	27.0	40.9	44.6	55.1	68.5	85.7	137	229	4670
Ge	22.4	25.6	29.2	44.0	48.8	60.1	74.5	93.1	149	249	5020
As	24.5	27.8	31.7	47.6	53.7	66.1	81.9	102	164	272	5400
Se	25.8	29.3	33.4	50.0	57.5	70.6	87.6	109	175	292	4920
Br	28.4	32.3	36.6	54.9	63.9	78.5	97.2	121	194	323	3980
Kr	30.1	34.1	38.8	57.9	68.0	83.5	103	129	207	346	1020
Rb	32.6	36.9	42.0	62.3	74.5	91.6	113	142	227	379	1120
Sr	35.0	39.7	45.0	66.7	82.3	101	125	156	248	411	1210
Y	37.8	42.9	48.6	71.6	90.0	111	137	171	273	452	1350
Zr	40.1	45.5	51.6	76.0	97.3	119	148	184	293	484	1470
Nb	43.0	48.6	55.1	80.8	105	129	159	199	317	524	1620
Mo	45.3	51.2	58.0	12.7	113	138	171	213	338	558	1760
Tc	47.5	53.7	60.6	13.5	120	147	181	226	358	590	1890
Ru	50.1	56.5	63.7	14.5	129	158	196	243	386	632	2080
Rh	53.0	59.7	10.4	15.7	139	170	210	261	413	677	2210
Pd	54.8	9.70	11.0	16.5	147	181	223	277	438	713	2390
Ag	9.21	10.5	11.9	17.9	158	193	239	296	468	761	2600
Cd	9.58	10.9	12.4	18.7	164	201	248	307	485	789	2940
In	10.2	11.6	13.2	19.9	174	213	263	326	512	831	2890
Sn	10.7	12.2	13.9	20.8	185	226	278	344	537	857	2990
Sb	11.4	13.0	14.8	22.2	193	236	290	359	563	907	3290
Te	11.7	13.3	15.1	22.8	200	244	300	371	577	805	3450
I	12.8	14.5	16.6	24.9	215	263	323	399	624	868	3520
Xe	13.4	15.2	17.3	26.0	224	274	336	415	644	663	3620
Cs	14.2	16.2	18.4	27.8	240	292	358	440	676	231	3890
Ba	14.8	16.9	19.2	29.0	251	305	372	457	612	244	4010
La	15.8	18.0	20.5	30.8	263	320	391	480	651	254	4150
Ce	16.8	19.1	21.8	32.8	279	338	411	502	505	278	4640
Pr	18.0	20.5	23.4	35.2	296	358	434	528	183	293	4890
Nd	18.8	21.4	24.4	36.6	307	371	450	481	191	307	4820
Pm	20.0	22.8	26.0	38.8	324	394	482	550	203	326	5100
Sm	20.7	23.5	26.8	40.3	331	398	422	385	209	335	5280
Eu	21.9	24.9	28.3	42.5	346	417	450	410	221	355	5200
Gd	22.5	25.6	29.1	43.6	353	373	334	147	229	367	5330
Tb	23.8	27.1	30.8	46.1	366	396	344	155	240	385	4850
Dy	24.8	28.2	32.0	47.9	333	296	131	161	249	399	5060
Ho	26.0	29.6	33.6	50.3	251	311	136	168	250	418	5330
Er	27.4	31.1	35.4	52.9	264	117	143	176	273	438	5570
Tm	28.7	32.6	37.0	55.2	279	123	150	185	287	460	5830
Yb	29.7	33.6	38.1	56.8	105	128	156	192	297	475	3930
Lu	31.3	35.5	40.3	60.0	110	134	163	200	310	497	1280
Hf	32.1	36.3	41.3	61.4	114	139	170	209	323	513	1340
Ta	33.8	38.3	43.4	64.5	119	144	176	216	334	536	1420
W	34.8	39.4	44.7	66.3	123	149	182	224	347	557	1490
Re	36.5	41.4	46.9	69.5	128	155	190	233	361	579	1560
Os	37.5	42.5	48.1	71.3	133	161	196	241	373	597	1630
Ir	39.3	44.5	50.4	74.3	138	167	204	251	389	625	1720
Pt	41.2	46.6	52.8	77.7	143	174	212	260	403	645	1800
Au	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

续表

发射源	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti	Al
λ/nm	0.0497	0.0521	0.0546	0.0632	0.139	0.150	0.162	0.176	0.208	0.251	0.796
E/keV 吸收体	24.9	23.8	22.7	19.6	8.91	8.26	7.65	7.06	5.95	4.93	1.56
Po	51.1	57.6	65.1	94.5	180	218	266	326	502	798	2380
At	53.1	60.0	67.7	98.6	188	228	278	341	527	837	2510
Rn	52.5	59.1	66.7	96.7	187	227	276	339	521	829	2480
Fr	54.5	61.4	69.3	100	195	236	287	353	548	863	2590
Ra	56.1	63.1	71.3	104	202	244	297	364	561	891	2700
Ac	58.4	65.6	73.8	93.5	210	254	310	380	585	887	2850
Th	59.6	67.1	75.7	67.2	215	260	317	389	598	906	2870
Pa	61.9	69.4	77.9	70.8	225	273	333	408	626	899	3000
U	62.8	70.3	78.8	71.7	228	276	336	411	629	902	3040
Np	65.2	73.1	82.0	75.0	239	289	352	431	657	951	3130
Pu	66.5	74.6	73.3	76.9	243	295	358	439	671	969	3240

表 10-4 质量吸收系数（L_{α_1} 线）

发射源	W	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti
λ/nm	0.148	0.415	0.437	0.460	0.541	1.33	1.46	1.60	1.76	2.16	2.74
E/keV 吸收体	8.40	2.98	2.84	2.70	2.29	0.930	0.851	0.776	0.705	0.573	0.452
H	0.00496	0.169	0.201	0.239	0.415	8.54	1[illegible].5	15.6	21.5	43.0	93.8
He	0.0458	1.59	1.89	2.26	3.96	76.0	99.9	133	179	342	710
Li	0.218	6.85	8.10	9.61	16.4	285	371	490	652	1200	2390
Be	0.685	20.2	23.7	28.0	47.3	739	949	1230	1610	2860	5490
B	1.71	46.0	53.7	62.9	104	1510	1940	2530	3300	5730	10500
C	3.60	90.7	105	123	199	2700	3450	4440	5760	9910	17900
N	6.06	148	172	200	322	4060	5110	6460	8230	13700	24200
O	9.49	221	255	295	469	5540	6960	8790	11200	18100	1790
F	13.3	293	338	391	617	6970	8680	10900	13700	1360	2500
Ne	19.5	411	474	547	858	9050	655	926	1280	2360	4370
Na	24.8	518	597	689	1080	826	1080	1400	1810	3050	5300
Mg	33.4	666	765	882	1370	1210	1530	1950	2480	4070	6960
Al	41.9	804	921	1060	1630	1440	1790	2250	2840	4660	8110
Si	54.0	1000	1150	1310	2000	1840	2290	2870	3630	5960	10400
P	64.3	1150	1310	1500	2250	2220	2770	3490	4430	7360	13000
S	79.8	1370	1560	1770	269	2870	3560	4470	5660	9300	16200
Cl	91.3	1510	1710	199	311	3240	4040	5090	6460	10700	18600
Ar	101	172	198	228	356	3710	4620	5810	7370	12100	20700
K	126	221	254	292	452	4760	5940	7480	9470	15500	26100
Ca	148	258	295	339	527	5880	7320	9170	11500	18000	26900
Sc	160	293	336	385	594	6040	7480	9310	11600	18300	28100
Ti	178	327	374	430	665	6860	8450	10400	12900	19300	3610
V	196	369	422	484	746	7440	9110	11200	13700	19900	4260
Cr	223	430	493	568	885	8830	10700	12800	15200	3330	4310
Mn	241	477	547	629	976	8810	10300	11900	13400	2520	4160
Fe	270	550	630	724	1120	10100	11900	13900	1810	2730	4330
Co	289	612	701	805	1240	10600	12300	1840	2220	2320	5190
Ni	323	698	797	913	1400	11400	1520	1810	2170	3200	4980
Cu	43.8	744	849	973	1490	1460	1750	2100	2530	3730	5680
Zn	49.1	828	946	1080	1660	1750	2080	2490	3000	4460	6900
Ga	52.6	880	1000	1150	1760	1930	2340	2850	3490	5310	8380
Ge	57.5	961	1100	1260	1920	2240	2730	3340	4110	6300	10000
As	63.1	1050	1200	1370	2090	2240	2710	3300	4020	6060	9430
Se	67.7	1120	1280	1460	2210	2700	3260	3970	4860	7350	11500
Br	75.2	1240	1410	1610	2440	3120	3780	4480	5290	7500	11000
Kr	79.9	1330	1510	1720	2590	3220	3840	4620	5570	8180	12300
Rb	87.6	1440	1640	1860	2770	3640	4350	5220	6270	9070	13200
Sr	96.7	1550	1760	2000	2990	4260	5200	6340	7710	11400	16900
Y	106	1670	1890	2150	2810	4510	5410	6460	7700	10900	15300
Zr	114	1790	2020	2300	2150	4980	6130	7610	9380	13700	18900
Nb	123	1920	2170	2150	623	5740	6980	8470	10200	14300	19100

续表

发射源	W	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti
λ/nm	0.148	0.415	0.437	0.460	0.541	1.33	1.46	1.60	1.76	2.16	2.74
E/keV 吸收体	8.40	2.98	2.84	2.70	2.29	0.930	0.851	0.776	0.705	0.573	0.452
Mo	132	2010	1990	2250	678	5770	6940	8330	9930	13700	17900
Tc	141	1900	2110	1730	739	6110	7350	8850	10600	14800	19600
Ru	152	1960	1610	532	793	6880	8190	9690	11300	14800	17500
Rh	163	432	494	566	860	7070	8470	10200	12100	16300	19500
Pd	173	472	541	620	943	7290	8640	10200	11900	14700	14900
Ag	185	517	585	664	997	8130	9500	10900	12400	15200	15500
Cd	192	567	658	763	1180	8140	9450	10900	12600	15900	16600
In	204	602	683	777	1160	8830	10500	12300	14400	18400	16000
Sn	216	628	714	813	1210	9060	10800	12800	12000	18400	3760
Sb	226	680	772	878	1310	10500	12700	15500	14500	22700	4090
Te	234	694	788	897	1350	9230	10800	13200	16600	26300	2790
I	252	749	847	961	1420	10300	11900	14200	17600	2780	3240
Xe	262	782	885	1000	1480	9020	10600	13100	16400	3090	3350
Cs	280	822	929	1050	1560	10300	11800	13700	1750	2790	4240
Ba	292	890	1000	1140	1670	10200	12100	2450	2780	3660	5010
La	307	937	1060	1190	1740	10800	12700	2040	2340	3100	4210
Ce	325	995	1130	1280	1890	11500	2130	2340	2570	3110	3750
Pr	343	1030	1160	1320	1960	1840	2040	2270	2530	3140	3880
Nd	357	1070	1210	1370	2030	1720	1930	2180	2460	3140	3960
Pm	378	1140	1290	1460	2170	2170	2420	2710	3060	3960	5310
Sm	383	1180	1330	1510	2230	2380	2820	3350	4010	5810	8660
Eu	401	1230	1390	1580	2340	2500	2950	3500	4170	6010	8910
Gd	408	1270	1430	1620	2400	2620	3070	3620	4290	6150	9130
Tb	378	1340	1510	1710	2530	2710	3200	3800	4530	6560	9840
Dy	283	1400	1580	1790	2630	2830	3350	3990	4780	6950	10500
Ho	297	1460	1650	1860	2730	2950	3480	4130	4930	7120	10600
Er	313	1520	1710	1930	2840	3130	3700	4410	5280	7660	11500
Tm	118	1580	1790	2020	2830	3290	3890	4630	5530	8010	12000
Yb	123	1630	1840	2070	2920	3500	4150	4950	5940	8660	13000
Lu	128	1700	1910	2160	3040	3710	4400	5260	6320	9250	14000
Hf	134	1750	1980	2250	2960	3960	4720	5660	6820	10100	15400
Ta	138	1830	2060	2230	3130	4030	4770	5680	6800	9870	14800
W	143	1900	2140	2320	3270	4220	4990	5930	7090	10300	15300
Re	149	1980	2130	2420	2900	4350	5130	6080	7240	10400	15400
Os	154	1950	2200	2340	2980	4490	5280	6250	7420	10600	15600
Ir	160	2030	2160	2450	3110	4730	5570	6590	7820	11200	16300
Pt	167	1980	2240	2530	3220	4970	5850	6920	8210	11700	17000
Au	173	2060	2320	2270	3330	5220	6140	7260	8620	12300	18000
Hg	179	2120	2060	2320	859	5460	6420	7590	9000	12800	18600
Tl	186	2190	2130	2410	894	5630	6600	7780	9200	13000	19200
Pb	193	1950	2200	2490	936	5880	6900	8130	9600	13400	18800
Bi	200	2020	2290	2590	982	6110	7150	8390	9890	13800	19700
Po	209	2130	2410	1880	1040	6450	7550	8870	10400	14500	4050
At	219	2240	1750	758	1100	6650	7760	9090	10700	14900	3560
Rn	218	1540	677	762	1100	6660	7800	9170	10800	15200	3050
Fr	227	636	713	801	1150	7050	8280	9770	11600	2180	2760
Ra	234	661	742	835	1200	7270	8530	10000	11900	2040	2590
Ac	244	695	782	881	1270	7440	8640	10100	11700	1940	2450
Th	250	710	797	895	1280	7700	9020	10600	12600	1830	2320
Pa	262	753	846	951	1360	7480	8550	9760	1420	1750	2210
U	265	764	857	963	1380	7500	8490	9550	1380	1690	2150
Np	278	828	934	1050	1500	6240	6680	6990	1350	1660	2100
Pu	283	826	925	1040	1480	8000	9090	1220	1350	1660	2100

（2）吸收边　实际上吸收系数与波长之间的关系是比较复杂的。对于特定的元素，随着入射 X 射线波长的增大，μ_m 值逐渐增大，但是，当波长增大到某一值时，μ_m 值会突然下降，发生突变。各元素 μ_m 突变时的波长值称为该元素的吸收边。物质对 X 射线的真吸收是产生吸收边的原因。对于同一元素，吸收边随着能级靠近原子核而逐渐变小，对于不同的元素，原子序数越大，其相应的吸收边越小。表 10-9 为元素的吸收边及激发电势。

利用吸收边可计算 X 射线管的最低管电压，设被测元素的某内层吸收边为 λ_{ab}，为激发该内层电子而产生 X 射线荧光，则要求初级 X 射线中必须包含波长稍小于 λ_{ab}的 X 射线，因此 X 射线管的管电压应满足式（10-12）。

$$V \geqslant 1240/\lambda_{ab} \tag{10-12}$$

4. 俄歇效应和荧光产额

以初级 X 射线作为激发源，来照射样品物质，使原子内层电子激发所产生的次级 X 射线叫 X 射线荧光，或称荧光 X 射线。

某元素所产生的荧光 X 射线光子可向原子外辐射，同时也可能在它的行程中继而击出该样品原子的较外层电子，这种电子叫俄歇电子，称此现象为俄歇效应。由于俄歇效应的存在，使 X 射线荧光的强度减小，从而影响测定的灵敏度。所谓荧光产额，是指原子中某内层电子因受 X 射线照射所产生的空位被较外层电子填充，并辐射出 X 射线荧光的分数几率。由荧光产额可大体了解各元素的测定灵敏度。

表 10-10 为 K 系荧光产额，表 10-11 为 L 系荧光产额的实验值，表 10-12 为 L 系荧光产额的理论值，表 10-13 为 M 系荧光产额的平均值。

表 10-5 质量吸收系数（L_{β_1} 线）

发射源	W	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti
λ/nm	0.128	0.393	0.415	0.437	0.518	1.31	1.43	1.57	1.73	2.13	2.70
E/keV 吸收体	9.67	3.15	2.99	2.83	2.39	0.950	0.869	0.791	0.718	0.583	0.458
H	0.00306	0.140	0.168	0.202	0.359	7.96	10.7	14.6	20.2	40.6	89.8
He	0.0285	1.31	1.58	1.90	3.41	71.0	93.8	125	169	324	681
Li	0.137	5.71	6.80	8.14	14.2	267	349	462	617	1140	2300
Be	0.432	16.9	20.0	23.9	41.1	695	897	1170	1530	2730	5290
B	1.08	38.8	45.6	54.0	90.7	1420	1840	2390	3130	5480	10200
C	2.27	77.0	90.1	106	175	2540	3260	4210	5480	9480	17300
N	3.86	126	147	172	284	3840	4850	6160	7850	13100	23400
O	6.08	188	219	256	415	5240	5610	8370	10700	17500	1710
F	8.57	251	291	339	546	6600	8260	10400	13100	1300	2420
Ne	12.6	353	409	476	761	8610	10600	864	1200	2250	4220
Na	16.2	444	515	599	959	773	1010	1320	1720	2920	5130
Mg	21.9	572	662	768	1220	1140	1450	1850	2370	3910	6760
Al	27.6	693	800	925	1450	1360	1700	2140	2710	4470	7860
Si	35.6	867	998	1150	1790	1750	2180	2740	3460	5720	10100
P	42.5	998	1150	1320	2020	2100	2630	3320	4220	7060	12600
S	53.1	1190	1370	1560	237	2720	3340	4270	5400	8930	15700
Cl	60.9	1320	1500	1710	277	3070	3840	4850	6160	10300	18000
Ar	67.5	147	171	199	316	3510	4390	5540	7040	11600	20100
K	84.6	190	220	255	403	4510	5650	7130	9050	14900	25300
Ca	100	223	256	296	468	5570	6970	8760	11000	17400	26400
Sc	108	253	292	337	529	5730	7120	8900	11100	17600	27500
Ti	121	282	325	376	592	6510	8060	10000	12400	18700	25900
V	134	319	367	424	665	7080	8700	10700	13200	19300	4200
Cr	152	370	427	495	786	8420	10200	12400	14800	19400	4250
Mn	166	411	474	549	868	8450	9990	11600	13100	2430	4040
Fe	187	475	547	633	996	9650	11500	13500	15400	2640	4210
Co	201	527	608	704	1110	10200	11900	13600	2140	3220	5060
Ni	227	604	694	800	1250	10900	8740	1740	2090	3100	4860
Cu	234	643	740	853	1330	11900	1680	2020	2440	3620	5550
Zn	254	716	824	949	1480	1680	2000	2400	2900	4310	6730
Ga	35.2	762	876	1010	1570	1840	2240	2740	3360	5130	8170
Ge	38.7	832	956	1100	1710	2130	2610	3200	3940	6080	9770
As	42.6	910	1040	1200	1870	2140	2600	3170	3870	5870	9200
Se	45.6	972	1120	1280	1980	2570	3130	3820	4670	7110	11200
Br	50.9	1070	1230	1420	2190	2970	3620	4330	5120	7290	10800

续表

发射源	W	Ag	Pd	Rh	Mo	Cu	Ni	Co	Fe	Cr	Ti
λ/nm	0.128	0.393	0.415	0.437	0.518	1.31	1.43	1.57	1.73	2.13	2.70
E/keV 吸收体	9.67	3.15	2.99	2.83	2.39	0.950	0.869	0.791	0.718	0.583	0.458
Kr	54.1	1150	1320	1520	2320	3080	3690	4450	5370	7930	12000
Rb	59.3	1250	1430	1640	2500	3480	4180	5030	6050	8800	13000
Sr	65.6	1350	1540	1770	2690	4050	4970	6090	7430	11100	16600
Y	71.6	1460	1670	1900	2840	4310	5200	6240	7440	10600	15000
Zr	77.6	1560	1780	2030	2670	4740	5850	7280	9020	13300	18700
Nb	83.5	1680	1910	2180	2080	5460	6680	8150	9840	14000	18900
Mo	89.7	1760	2000	2000	609	5510	6660	8030	9610	13400	17700
Tc	95.5	1850	1890	2110	663	5830	7050	8520	10200	14400	19400
Ru	103	1710	1950	471	712	6580	7880	9370	11000	14500	17400
Rh	111	1820	430	496	770	6750	8130	9800	11700	16000	19400
Pd	117	405	469	543	845	6980	8320	9900	11600	14500	15000
Ag	126	452	514	587	894	7800	9180	10600	12100	15000	15600
Cd	131	479	564	661	1050	7840	9140	10600	12300	15700	16700
In	139	524	599	686	1040	8460	10100	11900	14000	18200	16600
Sn	148	546	625	717	1090	8680	10400	12400	14700	17700	3710
Sb	154	591	676	775	1180	10100	12200	14900	13900	21900	4050
Te	160	604	690	791	1210	8930	10400	12600	15900	25500	2760
I	172	654	745	850	1280	9930	11500	13700	16800	2750	3210
Xe	180	684	779	888	1330	10900	10200	12500	15700	3070	3330
Cs	193	718	818	933	1410	10000	11400	13300	1670	2690	4150
Ba	201	778	885	1010	1510	9750	11700	14000	2710	3580	4920
La	211	822	933	1060	1570	10400	12200	1990	2280	3030	4140
Ce	225	870	991	1130	1700	11000	2090	2290	2520	3060	3710
Pr	239	897	1020	1170	1760	11500	1990	2220	2480	3090	3840
Nd	248	936	1060	1210	1830	1670	1880	2120	2400	3080	3910
Pm	260	998	1140	1290	1950	2110	2360	2650	2990	3870	5220
Sm	268	1030	1170	1330	2010	2280	2710	3230	3870	5640	8470
Eu	281	1080	1230	1400	2100	2400	2840	3380	4030	5840	8710
Gd	287	1110	1260	1440	2160	2520	2960	3500	4150	5970	8930
Tb	298	1170	1330	1520	2280	2600	3080	3660	4380	6370	9620
Dy	310	1220	1390	1580	2370	2720	3230	3850	4610	6740	10200
Ho	320	1280	1450	1650	2470	2830	3350	3990	4760	6910	10400
Er	291	1330	1510	1720	2560	3000	3560	4250	5100	7430	11200
Tm	308	1390	1580	1790	2680	3160	3750	4470	5340	7780	11700
Yb	228	1430	1620	1840	2630	3360	3990	4780	5730	8390	12700
Lu	239	1490	1690	1920	2740	3550	4230	5070	6100	8970	13700
Hf	249	1540	1750	1990	2840	3790	4530	5450	6580	9760	15000
Ta	96.0	1610	1820	2070	2800	3870	4590	5480	6570	9580	14500
W	99.1	1670	1890	2150	2930	4050	4800	5720	6850	9950	14900
Re	103	1740	1970	2140	3050	4180	4940	5870	7000	10100	15000
Os	107	1790	1940	2210	2700	4310	5090	6030	7180	10300	15200
Ir	111	1780	2020	2170	2800	4550	5370	6360	7570	10800	16000
Pt	116	1840	1970	2240	2910	4770	5630	6680	7940	11400	16700
Au	121	1920	2050	2330	3000	5010	5910	7010	8330	11900	17600
Hg	124	1870	2110	2070	3060	5250	6190	7330	8710	12400	18200
Tl	129	1920	2180	2140	2190	5410	6370	7520	8900	12700	18700
Pb	134	1990	1940	2210	849	5650	6650	7860	9290	13100	18400
Bi	139	1770	2020	2300	889	5880	6900	8120	9580	13500	19300
Po	146	1860	2120	2410	941	6200	7280	8580	10100	14200	3990
At	152	1960	2230	1760	999	6400	7490	8800	10400	14500	3510
Rn	152	1950	1530	679	998	6410	7520	8870	10500	14800	3010
Fr	158	2040	633	716	1040	6770	7980	9440	11200	15900	2730
Ra	163	1470	658	745	1090	6990	8220	9710	11500	2010	2550
Ac	170	610	692	785	1150	7170	8350	9750	11400	1900	2420
Th	174	626	707	800	1170	7400	8700	10300	12100	1800	2290
Pa	182	662	749	849	1240	7230	8300	9500	10800	1720	2180
U	184	672	760	860	1250	7260	8260	9330	1350	1660	2120
Np	193	724	824	937	1370	6120	6590	6940	1320	1630	2070
Pu	197	729	822	929	1350	7740	8840	1200	1520	1630	2070

表 10-6 质量吸收系数（M_α 线）

发射源	Bi	Pb	Tl	Hg	Au	Pt	Ir	Re	W	Ta	Hf
λ/nm	0.512	0.529	0.546	0.564	0.584	0.605	0.626	0.673	0.698	0.725	0.754
E/keV 吸收体	2.42	2.35	2.27	2.20	2.12	2.05	1.98	1.84	1.78	1.71	1.64
H	0.345	0.385	0.430	0.481	0.540	0.607	0.683	0.870	0.986	1.12	1.27
He	3.28	3.66	4.08	4.58	5.15	5.80	6.52	8.31	9.41	10.7	12.1
Li	13.7	15.3	17.0	18.9	21.2	23.7	26.6	33.5	378	42.5	48.3
Be	39.6	44.0	48.8	54.2	60.4	67.5	75.4	94.4	106	119	134
B	87.5	96.6	107	118	131	146	162	201	225	252	283
C	169	186	205	226	250	277	307	380	423	473	529
N	274	301	331	365	403	446	494	608	677	754	842
O	402	440	483	530	584	644	710	869	963	107	1190
F	529	579	634	696	765	842	928	1130	1250	1390	1550
Ne	737	807	882	967	1060	1170	1280	1560	1730	1910	2120
Na	929	1020	1110	1220	1330	1470	1610	1950	2150	2380	2630
Mg	1180	1290	1410	1540	1680	1850	2020	2440	2680	2950	3250
Al	1410	1530	1670	1820	1990	2170	2370	2840	3110	3410	3740
Si	1740	1890	2050	2230	2420	2640	2870	3410	335	373	416
P	1960	2130	2300	2500	253	279	308	376	415	460	511
S	229	251	276	304	335	369	407	495	547	605	671
Cl	268	293	320	350	384	421	462	559	616	681	753
Ar	307	335	365	400	438	480	527	637	703	776	859
K	390	426	465	508	556	610	669	810	893	986	1090
Ca	453	495	541	592	650	715	786	956	1060	1170	1300
Sc	513	559	609	666	728	798	875	1060	1160	1290	1420
Ti	574	626	682	746	817	897	985	1190	1320	1450	1610
V	645	703	766	837	916	1000	1100	1330	1470	1620	1790
Cr	762	832	909	995	1090	1200	1320	1600	1760	1950	2160
Mn	841	918	1000	1100	1200	1320	1440	1750	1920	2120	2340
Fe	966	1050	1150	1250	1370	1500	1650	1990	2190	2410	2670
Co	1080	1170	1280	1400	1530	1670	1830	2210	2450	2680	2960
Ni	1210	1320	1440	1570	1710	1870	2050	2470	2720	3000	3310
Cu	1290	1410	1530	1670	1820	2000	2180	2630	2890	3180	3510
Zn	1440	1560	1700	1850	2020	2210	2420	2910	3190	3510	3860
Ga	1520	1660	1800	1960	2140	2350	2560	3080	3380	3710	4090
Ge	1660	1810	1960	2140	2330	2550	2790	3340	3660	4010	4410
As	1810	1970	2140	2330	2540	2770	3020	3610	3950	4330	4750
Se	1930	2090	2270	2470	2690	2930	3190	3790	4140	4530	4350
Br	2130	2310	2510	2720	2960	3230	3520	4190	3970	4320	4720
Kr	2260	2450	2650	2870	3120	3380	3670	3810	4150	3300	888
Rb	2430	2630	2840	3070	3320	3190	3450	2960	790	876	972
Sr	2620	2830	3070	2890	3130	3400	2680	815	888	970	1060
Y	2770	2660	2870	3110	2450	689	750	894	978	1070	1180
Zr	2600	2810	2210	640	695	757	824	982	1070	1180	1290
Nb	2020	591	638	690	749	814	887	1060	1160	1280	1410
Mo	592	641	695	755	822	896	976	1170	1280	1400	1540
Tc	645	699	757	822	893	973	1060	1260	1380	1510	1660
Ru	692	750	813	883	961	1050	1140	1370	1500	1650	1820
Rh	748	812	881	959	1040	1140	1240	1480	1620	1770	1950
Pd	820	891	967	1050	1140	1250	1360	1610	1760	1930	2110
Ag	869	942	1020	1110	1210	1320	1440	1720	1880	2070	2270
Cd	1020	1110	1210	1320	1430	1560	1700	2010	2190	2390	2610
In	1010	1100	1190	1290	1400	1520	1650	1960	2130	2330	2550
Sn	1060	1150	1240	1340	1460	1580	1720	2040	2220	2420	2650
Sb	1140	1240	1340	1450	1580	1720	1870	2210	2420	2640	2890
Te	1180	1280	1380	1500	1630	1780	1940	2310	2530	2770	3030
I	1250	1350	1450	1580	1710	1850	2010	2380	2600	2840	3110
Xe	1300	1400	1510	1640	1770	1930	2090	2470	2690	2930	3200
Cs	1370	1480	1600	1740	1880	2050	2220	2640	2880	3140	3440
Ba	1470	1590	1710	1850	2000	2170	2350	2760	3010	3270	3560
La	1530	1650	1780	1920	2080	2250	2430	2850	3100	3380	3680
Ce	1660	1790	1930	2090	2270	2470	2680	3160	3450	3760	4100
Pr	1710	1850	2010	2170	2360	2570	2790	3310	3610	3940	4320
Nd	1780	1920	2080	2250	2450	2660	2890	3430	3740	4080	4470
Pm	1900	2050	2220	2400	2600	2830	3070	3630	3960	4310	4510
Sm	1950	2110	2280	2470	2680	2910	3160	3730	4070	4240	4650
Eu	2050	2210	2390	2590	2810	3050	3310	3920	4100	4490	4920

续表

发射源	Bi	Pb	Tl	Hg	Au	Pt	Ir	Re	W	Ta	Hf
λ/nm	0.512	0.529	0.546	0.564	0.584	0.605	0.626	0.673	0.698	0.725	0.754
E/keV 吸收体	2.42	2.35	2.27	2.20	2.12	2.05	1.98	1.84	1.78	1.71	1.64
Gd	2100	2270	2460	2660	2890	3130	3400	3860	4210	4610	4710
Tb	2220	2400	2590	2800	3040	3290	3570	4070	4450	4540	4970
Dy	2310	2490	2690	2910	3150	3410	3550	4220	4320	4710	4430
Ho	2400	2590	2790	3020	3130	3410	3710	4130	4510	4250	4670
Er	2500	2690	2900	3010	3260	3550	3620	4320	4050	4440	4880
Tm	2610	2810	2900	3150	3420	3480	3800	3860	4230	4640	5100
Yb	2670	2760	2990	3240	3300	3600	3920	3960	4320	4710	5150
Lu	2660	2880	3110	3170	3450	3760	3510	4180	4580	5020	5510
Hf	2770	2800	3040	3290	3580	3360	3650	4350	4750	3500	1190
Ta	2720	2950	3210	3490	3240	3520	3830	4550	3350	1150	1260
W	2840	3080	2870	3110	3370	3660	3980	3160	1130	1220	1330
Re	2960	2750	2970	3210	3470	3770	4090	1100	1190	1290	1400
Os	2620	2830	3050	3300	3570	3870	2850	1150	1240	1340	1460
Ir	2730	2950	3180	3440	3730	2740	1030	1210	1310	1410	1530
Pt	2830	3050	3300	2420	2610	1000	1080	1260	1370	1480	1610
Au	2920	3150	2320	910	980	1060	1140	1330	1440	1560	1690
Hg	2980	2220	878	947	1020	1100	1190	1390	1510	1630	1770
Tl	2130	849	914	986	1060	1150	1240	1450	1570	1700	1850
Pb	827	890	957	1030	1110	1200	1290	1510	1630	1770	1920
Bi	866	933	1000	1080	1170	1260	1360	1590	1720	1860	2020
Po	917	987	1060	1140	1230	1330	1440	1680	1810	1960	2130
At	973	1050	1130	1210	1310	1410	1520	1770	1910	2070	2240
Rn	973	1050	1120	1210	1300	1400	1510	1760	1900	2050	2220
Fr	1020	1090	1170	1260	1360	1460	1570	1830	1980	2140	2320
Ra	1060	1140	1220	1320	1420	1530	1640	1910	2060	2230	2420
Ac	1120	1210	1300	1390	1500	1620	1740	2020	2180	2360	2550
Th	1140	1220	1310	1410	1510	1630	1750	2040	2200	2380	2570
Pa	1210	1300	1390	1490	1610	1730	1860	2150	2320	2500	2700
U	1220	1310	1410	1510	1620	1750	1880	2180	2350	2530	2730
Np	1340	1430	1530	1640	1760	1890	2020	2320	2480	2660	2850
Pu	1310	1410	1510	1620	1740	1870	2010	2330	2510	2700	2920

表 10-7　质量吸收系数（M_β 线）

发射源	Bi	Pb	Tl	Hg	Au	Pt	Ir	Re	W	Ta	Hf
λ/nm	0.491	0.508	0.525	0.543	0.562	0.583	0.604	0.650	0.676	0.702	0.730
E/keV 吸收体	2.53	2.44	2.36	2.28	2.20	2.13	2.05	1.91	1.83	1.77	1.70
H	0.299	0.335	0.375	0.422	0.475	0.536	0.604	0.776	0.883	1.00	1.15
He	2.84	3.19	3.58	4.01	4.52	5.12	5.77	7.41	8.43	9.59	10.9
Li	11.9	13.3	14.9	16.7	18.7	21.0	23.6	30.0	34.0	38.5	43.6
Be	34.7	38.6	43.0	48.0	53.6	60.0	67.2	84.9	95.7	108	122
B	77.0	85.3	94.6	105	117	130	145	182	204	229	257
C	150	165	183	202	224	249	276	344	384	430	482
N	242	268	295	326	361	401	445	551	616	688	769
O	357	392	431	476	525	580	641	790	879	979	1090
F	470	517	568	625	689	760	839	1030	1140	1270	1420
Ne	657	721	791	870	957	1060	1160	1420	1580	1750	1950
Na	828	908	996	1090	1200	1330	1460	1780	1970	2190	2420
Mg	1060	1160	1270	1390	1520	1670	1840	2230	2460	2720	3000
Al	1260	1380	1510	1650	1800	1980	2160	2610	2870	3150	3470
Si	1560	1700	1850	2020	2210	2410	2630	3150	304	340	381
P	1770	1920	2090	2270	2470	252	278	342	380	422	469
S	2080	223	246	272	301	333	368	451	501	556	617
Cl	239	262	287	315	347	381	419	511	565	626	693
Ar	274	300	328	360	396	435	478	583	644	713	790
K	349	382	418	458	503	553	608	740	819	906	1000
Ca	405	443	486	533	586	646	712	872	967	1070	1200
Sc	459	502	549	601	659	724	795	967	1070	1180	1310
Ti	513	561	614	673	739	813	893	1090	1210	1340	1480
V	577	631	690	756	829	911	1000	1220	1350	1490	1650

续表

发射源	Bi	Pb	Tl	Hg	Au	Pt	Ir	Re	W	Ta	Hf
λ/nm	0.491	0.508	0.525	0.543	0.562	0.583	0.604	0.650	0.676	0.702	0.730
E/keV 吸收体	2.53	2.44	2.36	2.28	2.20	2.13	2.05	1.91	1.83	1.77	1.70
Cr	679	745	816	896	985	1080	1190	1460	1620	1790	1990
Mn	752	823	901	988	1080	1190	1310	1600	1770	1950	2160
Fe	863	945	1030	1130	1240	1360	1500	1820	2010	2220	2460
Co	961	1050	1150	1260	1380	1520	1670	2030	2240	2470	2730
Ni	1090	1190	1290	1420	1550	1700	1870	2260	2500	2760	3050
Cu	1160	1260	1380	1510	1650	1810	1990	2410	2660	2930	3240
Zn	1290	1410	1530	1680	1840	2010	2200	2670	2940	3240	3570
Ga	1370	1490	1630	1780	1950	2130	2340	2820	3110	3430	3780
Ge	1490	1630	1770	1940	2120	2320	2540	3060	3370	3710	4080
As	1630	1770	1930	2110	2310	2520	2760	3320	3650	4010	4400
Se	1730	1890	2050	2240	2440	2670	2920	3500	3830	4200	4600
Br	1910	2080	2270	2470	2700	2950	3220	3860	4230	4020	4390
Kr	2030	2210	2400	2610	2850	3100	3370	3530	3850	4200	3380
Rb	2190	2380	2580	2800	3040	3310	3180	3770	3010	802	893
Sr	2360	2570	2790	3030	2870	3120	3390	755	823	900	986
Y	2510	2720	2620	2840	3080	2430	687	823	903	992	1090
Zr	2350	2550	2760	2180	634	692	754	904	992	1090	1200
Nb	2520	1980	582	630	684	745	811	974	1070	1180	1300
Mo	1920	579	630	686	748	817	892	1070	1180	1290	1420
Tc	581	632	687	747	814	889	969	1160	1270	1400	1540
Ru	625	678	737	802	875	956	1040	1260	1380	1520	1680
Rh	672	732	798	870	950	1040	1130	1360	1490	1640	1800
Pd	737	803	875	954	1040	1140	1240	1490	1630	1780	1960
Ag	783	851	925	1010	1100	1200	1310	1580	1740	1910	2100
Cd	914	1000	1090	1190	1300	1420	1550	1860	2030	2220	2430
In	914	993	1080	1170	1270	1390	1510	1810	1980	2160	2370
Sn	957	1040	1130	1230	1330	1450	1580	1880	2060	2250	2460
Sb	1030	1120	1220	1320	1440	1570	1710	2040	2240	2450	2690
Te	1060	1150	1250	1360	1490	1630	1770	2130	2330	2560	2810
I	1130	1220	1320	1440	1560	1700	1850	2200	2410	2630	2880
Xe	1170	1270	1380	1500	1620	1770	1920	2280	2490	2720	2980
Cs	1240	1340	1460	1580	1720	1870	2040	2430	2660	2910	3190
Ba	1330	1440	1560	1690	1830	1990	2160	2560	2790	3040	3320
La	1390	1500	1630	1760	1910	2070	2240	2650	2890	3140	3430
Ce	1500	1620	1760	1910	2080	2260	2460	2920	3200	3490	3820
Pr	1550	1680	1820	1980	2150	2350	2560	3050	3340	3660	4010
Nd	1610	1740	1890	2050	2230	2430	2650	3160	3460	3790	4150
Pm	1720	1860	2020	2190	2380	2590	2820	3360	3670	4010	4380
Sm	1770	1920	2080	2250	2450	2670	2900	3450	3770	4120	4310
Eu	1850	2010	2180	2360	2570	2790	3040	3620	3950	4150	4560
Gd	1900	2060	2240	2430	2640	2870	3120	3720	3900	4270	4690
Tb	2010	2180	2360	2560	2780	3020	3280	3750	4110	4510	4610
Dy	2090	2260	2450	2660	2880	3130	3400	3890	4000	4370	4790
Ho	2180	2360	2550	2760	2990	3120	3400	3800	4170	4570	4320
Er	2260	2450	2650	2870	2980	3250	3540	3970	4360	4110	4510
Tm	2360	2560	2760	2870	3120	3410	3470	4170	3900	4290	4720
Yb	2420	2620	2710	2950	3210	3280	3580	3660	4000	4370	4790
Lu	2510	2610	2830	3070	3140	3430	3750	3850	4220	4640	5100
Hf	2500	2710	2760	3000	3260	3560	3350	4000	4390	4820	3540
Ta	2620	2670	2900	3160	3450	3220	3510	4200	4600	3380	1180
W	2560	2780	3030	3300	3080	3350	3650	4360	3190	1140	1240
Re	2670	2900	2710	2930	3180	3460	3760	3030	1110	1200	1300
Os	2760	2580	2780	3020	3270	3550	3860	1070	1160	1260	1360
Ir	2470	2680	2900	3140	3410	3710	2730	1120	1220	1320	1430
Pt	2560	2770	3000	3260	3540	2600	1000	1180	1280	1390	1500
Au	2650	2870	3100	2290	902	976	1050	1240	1340	1460	1580
Hg	2710	2930	2180	868	939	1020	1100	1290	1400	1520	1660
Tl	2820	2090	835	904	978	1060	1150	1350	1460	1590	1730
Pb	2010	812	876	946	1020	1110	1190	1400	1520	1650	1790
Bi	786	850	918	993	1070	1160	1260	1480	1600	1740	1890
Po	833	899	971	1050	1130	1230	1330	1560	1690	1840	1990
At	884	955	1030	1110	1200	1300	1410	1650	1790	1940	2100

续表

发射源	Bi	Pb	Tl	Hg	Au	Pt	Ir	Re	W	Ta	Hf
λ/nm	0.491	0.508	0.525	0.543	0.562	0.583	0.604	0.650	0.676	0.702	0.730
E/keV 吸收体	2.53	2.44	2.36	2.28	2.20	2.13	2.05	1.91	1.83	1.77	1.70
Rn	886	955	1030	1110	1200	1290	1400	1640	1770	1920	2080
Fr	928	1000	1080	1160	1250	1350	1460	1710	1850	2000	2170
Ra	968	1040	1120	1210	1310	1410	1520	1780	1930	2090	2260
Ac	1020	1100	1190	1280	1380	1490	1610	1880	2040	2210	2390
Th	1040	1120	1200	1290	1390	1510	1620	1900	2050	2220	2410
Pa	1100	1190	1280	1380	1480	1600	1720	2010	2170	2350	2540
U	1110	1200	1290	1390	1500	1620	1740	2030	2200	2370	2570
Np	1220	1310	1410	1520	1630	1750	1880	2170	2340	2510	2690
Pu	1200	1290	1390	1490	1610	1730	1860	2170	2350	2540	2740

表 10-8 若干有机薄膜和混合气体的质量吸收系数

波长 λ/nm	聚乙烯醇缩甲醛 $(C_5H_7O_2)_x$	聚酯 $(C_{10}H_8O_4)_x$	空气①	P_{10}②	波长 λ/nm	聚乙烯醇缩甲醛 $(C_5H_7O_2)_x$	聚酯 $(C_{10}H_8O_4)_x$	空气①	P_{10}②
0.20	14	14	21	230	5.20	4910	5100	6300	
0.40	113	116	148	162	5.40	5400	5600	7000	
0.60	372	384	481	467	5.60	5900	6100	7600	
0.80	850	870	1090	1020	5.80	6400	6600	8200	
1.00	1580	1630	2020	1850	6.00	7000	7200	8900	
1.20	2600	2680	3310	3010	6.20	7500	7800	9700	
1.40	3920	4040	4980	4500	6.40	8100	8400	10400	
1.60	5600	5800	7100	6400	6.60	8700	9000	11200	
1.80	7500	7800	9500	8400	6.80	9400	9700	12100	
2.00	9900	10200	12400	10900	7.00	10000	10300	12900	
2.20	12500	12900	15700	13500	7.20	10700	11100	13800	
2.40	8200	8500	14100	16400	7.40	11400	11800	14700	
2.60	10100	10400	17100	19600	7.60	12200	12500	15600	
2.80	12000	12400	20400	22800	7.80	12900	13300	16600	
3.00	14300	14700	24000	26300	8.00	13600	14100	17600	
3.20	16700	17200	2290	29700	8.20	14500	14900	18600	
3.40	19300	19900	2650	33300	8.40	15300	15800	19700	
3.60	22100	22800	3040	36900	8.60	16100	16600	20800	
3.80	25000	25800	3460	40500	8.80	17000	17500	21900	
4.00	28200	29100	3810	37600	9.00	17800	18400	23100	
4.20	31500	32500	4270	40900	9.20	18800	19400	24200	
4.40	3250	3350	4780	42600	9.40	19700	20300	25400	
4.60	3640	3760	5300	45600	9.60	20600	21300	26700	
4.80	4050	4170	5900	48900	9.80	21600	22300	28000	
5.00	4450	4590	6400	52000	10.00	22600	23300	29200	

① 其中，O_2 含量为 21%，N_2 含量为 78%，Ar 为 1%。

② 其中 CH_4 含量为 10%，Ar 为 90%。

表 10-9 元素的吸收边和激发电势[3]

原子序数	元素	K 吸收边		L_1 吸收边		L_2 吸收边		L_3 吸收边		M_4 吸收边		M_5 吸收边	
		λ/nm	E/keV	λ/nm	E/keV	λ/nm	keV	λ/nm	keV	λ/nm	keV	λ/nm	keV
1	H	91.8	0.014										
2	He	50.4	0.025										
3	Li	22.6953	0.055										
4	Be	10.69	0.116										
5	B	5.46	0.192										
6	C	4.3767	0.283										
7	N	3.1052	0.399										
8	O	2.3367	0.531										
9	F	1.805	0.687										
10	Ne	1.419	0.874	25.8	0.048	56.4	0.022	56.4	0.022				
11	Na	1.148	1.08	22.5	0.055	36.5	0.034	36.5	0.034				
12	Mg	0.9512	1.303	19.7	0.063	24.8	0.050	25.3	0.049				
13	Al	0.7951	1.559	14.3	0.087	17.0	0.073	17.2	0.072				
14	Si	0.6745	1.837	10.5	0.118	12.5	0.099	12.7	0.098				

续表

原子序数	元素	K 吸收边 λ/nm	K 吸收边 E/keV	L_1 吸收边 λ/nm	L_1 吸收边 E/keV	L_2 吸收边 λ/nm	L_2 吸收边 keV	L_3 吸收边 λ/nm	L_3 吸收边 keV	M_4 吸收边 λ/nm	M_4 吸收边 keV	M_5 吸收边 λ/nm	M_5 吸收边 keV
15	P	0.5787	2.142	8.10	0.153	9.61	0.129	9.69	0.128				
16	S	0.5018	2.470	6.42	0.193	7.56	0.164	7.61	0.163				
17	Cl	0.4397	2.819	5.21	0.238	6.11	0.203	6.14	0.202				
18	Ar	0.3871	3.202	4.32	0.287	5.02	0.247	5.06	0.245				
19	K	0.3437	3.606	3.64	0.341	4.18	0.297	4.22	0.294				
20	Ca	0.3070	4.037	3.07	0.399	3.52	0.352	3.55	0.349				
21	Sc	0.2757	4.495	2.68	0.462	3.02	0.411	3.08	0.402				
22	Ti	0.2497	4.963	2.34	0.530	2.70	0.460	2.73	0.454				
23	V	0.2269	5.462	2.05	0.604	2.39	0.519	2.42	0.512				
24	Cr	0.2070	5.987	1.83	0.679	2.13	0.583	2.16	0.574				
25	Mn	0.1896	6.535	1.63	0.762	1.91	0.650	1.94	0.639				
26	Fe	0.1743	7.109	1.46	0.849	1.72	0.721	1.75	0.708				
27	Co	0.1608	7.707	1.33	0.929	1.56	0.794	1.59	0.779				
28	Ni	0.1488	8.329	1.222	1.015	1.42	0.871	1.45	0.853				
29	Cu	0.1380	8.978	1.127	1.100	1.30	0.953	1.33	0.933				
30	Zn	0.1283	9.657	1.033	1.200	1.187	1.045	1.213	1.022				
31	Ga	0.1196	10.365	0.954	1.30	1.093	1.134	1.110	1.117				
32	Ge	0.1117	11.100	0.873	1.42	0.994	1.248	1.019	1.217				
33	As	0.1045	11.860	0.8107	1.529	0.9124	1.358	0.939	1.32				
34	Se	0.0980	12.649	0.7506	1.651	0.8416	1.473	0.867	1.43				
35	Br	0.0920	13.471	0.697	1.78	0.780	1.59	0.800	1.55				
36	Kr	0.0866	14.319	0.646	1.92	0.721	1.72	0.743	1.67				
37	Rb	0.0816	15.197	0.5998	2.066	0.6643	1.865	0.689	1.80				
38	Sr	0.0770	16.101	0.5583	2.220	0.6172	2.008	0.6387	1.940				
39	Y	0.0728	17.032	0.5232	2.369	0.5755	2.153	0.5962	2.079				
40	Zr	0.0689	17.993	0.4867	2.546	0.5378	2.304	0.5583	2.220				
41	Nb	0.0653	18.981	0.4581	2.705	0.5026	2.467	0.5223	2.373				
42	Mo	0.0620	19.996	0.4298	2.883	0.4718	2.627	0.4913	2.523				
43	Tc	0.0589	21.045	0.4060	3.054	0.4436	2.795	0.4632	2.677				
44	Ru	0.0561	22.112	0.383	3.24	0.4180	2.965	0.4369	2.837				
45	Rh	0.0534	23.217	0.3626	3.418	0.3942	3.144	0.4130	3.001				
46	Pd	0.0509	24.341	0.3428	3.616	0.3724	3.328	0.3908	3.171				
47	Ag	0.0486	25.509	0.3254	3.809	0.3514	3.527	0.3698	3.351				
48	Cd	0.0464	26.704	0.3085	4.018	0.3326	3.726	0.3504	3.537				
49	In	0.0444	27.920	0.2926	4.236	0.3147	3.938	0.3324	3.728				
50	Sn	0.0425	29.182	0.2777	4.463	0.2982	4.156	0.3156	3.927				
51	Sb	0.0407	30.477	0.2639	4.695	0.2830	4.380	0.3000	4.131				
52	Te	0.0390	31.800	0.2511	4.937	0.2687	4.611	0.2855	4.340				
53	I	0.0374	33.155	0.2389	5.188	0.2553	4.855	0.2719	4.557				
54	Xe	0.0359	34.570	0.2274	5.451	0.2429	5.102	0.2592	4.780				
55	Cs	0.0345	35.949	0.2167	5.719	0.2314	5.356	0.2474	5.010				
56	Ba	0.0311	37.399	0.2068	5.994	0.2204	5.622	0.2363	5.245	1.556	0.7967	1.589	0.7801
57	La	0.0318	38.920	0.1973	6.282	0.2103	5.893	0.2258	5.488				
58	Ce	0.0307	40.438	0.1889	6.559	0.2011	6.163	0.2164	5.727				
59	Pr	0.0295	41.986	0.1811	6.844	0.1924	6.441	0.2077	5.967	1.3122	0.9448	1.3394	0.9257
60	Nd	0.0285	43.559	0.1735	7.142	0.1843	6.725	0.1995	6.213	1.2459	0.9951	2.3737	0.9734
61	Pm	0.0274	45.207	0.1665	7.448	0.1767	7.018	0.1918	6.466				
62	Sm	0.0265	46.833	0.1599	7.752	0.1703	7.279	0.1845	6.719	1.1288	1.0983	1.1552	1.0732
63	Eu	0.0256	48.501	0.1536	8.066	0.1626	7.621	0.1775	6.981	1.0711	1.1575	1.1013	1.1258
64	Gd	0.0247	50.215	0.1477	8.391	0.1561	7.938	0.1710	7.250				
65	Tb	0.0238	51.984	0.1421	8.722	0.1501	8.256	0.1649	7.517				
66	Dy	0.0231	53.773	0.1365	9.081	0.1438	8.619	0.1579	7.848				
67	Ho	0.0223	55.599	0.1317	9.408	0.1390	8.918	0.1535	8.072				
68	Er	0.0216	57.465	0.1268	9.773	0.1338	9.260	0.1482	8.361	0.8601	1.4415	0.8847	1.4013
69	Tm	0.0209	59.319	0.1222	10.141	0.1288	9.626	0.1433	8.650			0.8487	1.4609
70	Yb	0.0202	61.282	0.1182	10.487	0.1243	9.972	0.1386	8.941				
71	Lu	0.0196	63.281	0.1140	10.870	0.1199	10.341	0.1341	9.239				
72	Hf	0.0190	65.292	0.1100	11.271	0.1155	10.732	0.1297	9.554				
73	Ta	0.0184	67.379	0.1061	11.681	0.1114	11.128	0.1255	9.874	0.687	1.804	0.711	1.743
74	W	0.0178	69.479	0.1025	12.097	0.1075	11.533	0.1216	10.196	0.659	1.880	0.683	1.814
75	Re	0.0173	71.590	0.0990	12.524	0.1037	11.953	0.1177	10.529	0.633	1.958	0.6560	1.890
76	Os	0.0168	73.856	0.0956	12.968	0.1001	12.380	0.1140	10.867	0.6073	2.042	0.630	1.967
77	Ir	0.0163	76.096	0.0923	13.427	0.0967	12.817	0.1106	11.209	0.583	2.126	0.605	2.048
78	Pt	0.0158	78.352	0.0893	13.875	0.0934	13.266	0.1072	11.556	0.559	2.217	0.581	2.133
79	Au	0.0153	80.768	0.0863	14.354	0.0903	13.731	0.1040	11.917	0.5374	2.307	0.5584	2.220

续表

原子序数	元素	K 吸收边		L_1 吸收边		L_2 吸收边		L_3 吸收边		M_4 吸收边		M_5 吸收边	
		λ/nm	E/keV	λ/nm	E/keV	λ/nm	keV	λ/nm	keV	λ/nm	keV	λ/nm	keV
80	Hg	0.0149	83.046	0.0835	14.837	0.0872	14.210	0.1008	12.3	0.5157	2.404	0.536	2.313
81	Ti	0.0145	85.646	0.0808	15.338	0.0843	14.695	0.0979	12.655	0.4952	2.504	0.5153	2.406
82	Pb	0.0141	88.037	0.0782	15.858	0.0815	15.205	0.0950	13.041	0.4757	2.606	0.4955	2.502
83	Bi	0.0137	90.420	0.0757	16.376	0.0789	15.713	0.0923	13.422	0.4572	2.711	0.4764	2.603
84	Po	0.0133	93.112	0.0732	16.935	0.0763	16.244	0.0897	13.817				
85	At	0.0130	95.740	0.0709	17.490	0.0739	16.784	0.0872	14.215				
86	Rn	0.0126	98.418	0.0687	18.058	0.0715	17.337	0.0848	14.618				
87	Er	0.0123	101.147	0.0665	18.638	0.0693	17.904	0.0825	15.028				
88	Ra			0.0645	19.229	0.0671	18.478	0.0803	15.439				
89	Ac	0.0116	106.759	0.0625	19.842	0.0650	19.078	0.0782	15.865				
90	Th	0.0113	109.741	0.0606	20.458	0.0630	19.677	0.0761	16.293	0.3557	3.485	0.3729	3.325
91	Pa	0.0110	112.581	0.0588	21.102	0.0611	20.311	0.0741	16.731	0.3436	3.608	0.3618	3.436
92	U	0.0108	115.610	0.0569	21.764	0.0592	20.938	0.0722	17.160	0.3333	3.720	0.3497	3.545
93	Np	0.0105	118.619	0.0553	22.417	0.0574	21.596	0.0704	17.614				
94	Pu	0.0102	121.720	0.0537	23.097	0.0557	22.262	0.0686	18.066				
95	Am	0.0099	124.816	0.0521	23.793	0.0540	22.944	0.0669	18.525				
96	Cm	0.0097	128.088	0.0506	24.503	0.0525	23.640	0.0653	18.990				
97	Bk	0.0094	131.357	0.0491	25.230	0.0509	24.352	0.0637	19.461				
98	Cf	0.0092	134.683	0.0477	25.971	0.0494	25.080	0.0622	19.938				
99	Es	0.0090	138.067	0.0464	26.729	0.0480	25.824	0.0607	20.422				
100	Fm	0.0088	141.510	0.0451	27.503	0.0466	26.584	0.0593	20.912				

表 10-10　K 系荧光产额

原子序数	元素	ω_K	原子序数	元素	ω_K	原子序数	元素	ω_K	原子序数	元素	ω_K
6	C	0.0009	27	Co	0.345	47	Ag	0.83	67	Ho	0.945
7	N	0.0015	28	Ni	0.375	48	Cd	0.84	68	Er	0.945
8	O	0.0022	29	Cu	0.41	49	In	0.85	69	Tm	0.95
10	Ne	0.0100	30	Zn	0.435	50	Sn	0.86	70	Yb	0.95
11	Na	0.020	31	Ga	0.47	51	Sb	0.87	71	In	0.95
12	Mg	0.030	32	Ge	0.50	52	Te	0.875	72	Hf	0.955
13	Al	0.040	33	As	0.53	53	I	0.88	73	Ta	0.955
14	Si	0.055	34	Se	0.565	54	Xe	0.89	74	W	0.96
15	P	0.070	35	Br	0.60	55	Cs	0.895	75	Re	0.96
16	S	0.090	36	Kr	0.635	56	Ba	0.90	76	Os	0.96
17	Cl	0.105	37	Rb	0.665	57	La	0.905	77	Ir	0.96
18	Ar	0.125	38	Sr	0.685	58	Ce	0.91	78	Pd	0.965
19	K	0.140	39	Y	0.71	59	Pr	0.915	79	Au	0.965
20	Sc	0.165	40	Zr	0.72	60	Nd	0.92	80	Hg	0.965
21	Ca	0.190	41	Nb	0.755	61	Pm	0.925	82	Pb	0.97
22	Ti	0.220	42	Mo	0.77	62	Sm	0.93	92	U	0.97
23	V	0.240	43	Tc	0.785	63	Eu	0.93			
24	Cr	0.26	44	Ru	0.80	64	Gd	0.935			
25	Mn	0.285	45	Rh	0.81	65	Tb	0.94			
26	Fe	0.32	46	Pd	0.82	66	Dy	0.94			

表 10-11　L 系荧光产额的实验值

原子序数	元素	ω_1	ω_2	ω_3	原子序数	元素	ω_1	ω_2	ω_3
54	Xe			0.10±0.01	73	Ta		0.25±0.02	0.27±0.01
56	Ba	0.06		0.05±0.01				0.257±0.013	0.25±0.03
65	Tb	0.18	0.165±0.018	0.188±0.016					0.191
67	Ho			0.22±0.03					0.228±0.013
			0.170±0.055	0.169±0.030					0.254±0.025
68	Er			0.21±0.03	74	W			0.207
			0.185±0.060	0.172±0.032					0.272±0.037
70	Yb			0.20±0.02	75	Re			0.284±0.043
			0.188±0.011	0.183±0.011	76	Os			0.290±0.030
71	Lu			0.22±0.03	77	Ir			0.244
				0.251±0.035					0.262±0.036
72	Hf			0.22±0.03	78	Pt		0.331±0.021	0.262
				0.228±0.025					0.31±0.04

续表

原子序数	元素	ω_1	ω_2	ω_3	原子序数	元素	ω_1	ω_2	ω_3
				0.317±0.029					0.35±0.05
				0.291±0.018					0.354±0.028
79	Au			0.276	83	Bi	0.12±0.01	0.32±0.04	0.367
				0.31±0.04			0.095±0.005	0.38±0.02	0.36
				0.317±0.025					0.37±0.05
80	Hg		0.39±0.03	0.40±0.02					0.362±0.029
			0.319±0.010	0.32±0.05					0.40±0.05
				0.367±0.050					0.340±0.018
				0.300±0.010	90	Th			0.42
81	Tl	0.07±0.02	0.319±0.010	0.37±0.07					0.517±0.042
			0.373±0.025	0.386±0.053	91	Pa			0.46±0.05
				0.306±0.010	92	U			0.44
				0.330±0.021					0.500±0.040
82	Pb	0.07±0.02	0.363±0.015	0.337	96	Cm	0.28±0.06	0.552±0.032	0.515±0.034
		0.09±0.02		0.315±0.013				0.55±0.02	0.63±0.02
				0.32					

表 10-12 L 系荧光产额的理论值

原子序数	元素	ω_1	ω_2	ω_3	原子序数	元素	ω_1	ω_2	ω_3
13	Al	3.05×10^{-6}		0.00240	42	Mo	0.00575	0.0350	0.0373
14	Si	9.77×10^{-6}		0.00108			0.00634	0.0245	0.0259
15	P	2.12×10^{-5}		4.1×10^{-4}	44	Ru	0.00774	0.0418	0.0450
16	S	3.63×10^{-5}		2.9×10^{-4}	47	Ag	0.0102	0.0547	0.0602
17	Cl	5.60×10^{-5}		2.3×10^{-4}			0.0101	0.0430	0.0449
18	Ar	8.58×10^{-5}		1.9×10^{-4}	50	Sn	0.0130	0.0656	0.0737
19	K	1.15×10^{-4}		2.1×10^{-4}			0.0130	0.0567	
20	Ca	1.56×10^{-4}		2.1×10^{-4}	51	Sb	0.0311	0.0616	0.0633
22	Ti	2.80×10^{-4}		0.00118	54	Xe	0.0584	0.0912	0.0970
24	Cr	2.97×10^{-4}		0.00329	56	Ba	0.0446	0.0907	0.0899
26	Fe	3.84×10^{-4}	0.00143	0.00559	60	Nd	0.0746	0.133	0.135
				0.00149			0.0600	0.120	0.120
28	Ni	4.63×10^{-4}	0.00269	0.00802	65	Tb		0.166	0.160
29	Cu		0.00357	0.00383	67	Ho	0.112	0.203	0.201
30	Zn	5.23×10^{-4}		0.0108			0.094		
32	Ge	7.70×10^{-4}	0.00772	0.0144	70	Yb	0.112		
33	As	0.00140	0.00885	0.00974	74	W	0.115	0.287	0.268
34	Se	0.00130	0.00994	0.0178			0.138	0.271	0.253
35	Br		0.0109		79	Au	0.105	0.357	0.327
36	Kr	0.00185	0.0220	0.0236	80	Hg	0.098	0.352	0.321
		0.00219	0.0119	0.0123	83	Bi	0.120	0.417	0.389
37	Rb	0.0132			85	At	0.129	0.422	0.380
38	Sr	0.00300	0.0224	0.0243	90	Th	0.197	0.529	0.461
40	Zr	0.00397	0.0294	0.0295	93	Np		0.460	0.472
		0.00396	0.0189	0.0201					

表 10-13 M 系荧光产额的平均值

原子序数	元素	ω_M	原子序数	元素	ω_M	原子序数	元素	ω_M	原子序数	元素	ω_M
37	Rb	0.001	53	I	0.003	69	Tm	0.012	85	At	0.040
38	Sr	0.001	54	Xe	0.003	70	Yb	0.013	86	Rn	0.043
39	Y	0.001	55	Cs	0.004	71	Lu	0.014	87	Fr	0.046
40	Zr	0.001	56	Ba	0.004	72	Hf	0.015	88	Ra	0.049
41	Nb	0.001	57	La	0.004	73	Ta	0.016	89	Ac	0.052
42	Mo	0.001	58	Ce	0.005	74	W	0.018	90	Th	0.056
43	Tc	0.001	59	Pr	0.005	75	Re	0.019	91	Pa	0.060
44	Ru	0.001	60	Nd	0.006	76	Os	0.020	92	U	0.064
45	Rh	0.001	61	Pm	0.006	77	Ir	0.022	93	Np	0.068
46	Pd	0.001	62	Sm	0.007	78	Pt	0.024	94	Pu	0.073
47	Ag	0.002	63	Eu	0.007	79	Au	0.026	95	Am	0.077
48	Cd	0.002	64	Gd	0.008	80	Hg	0.028	96	Cm	0.083
49	In	0.002	65	Tb	0.009	81	Tl	0.030	97	Bk	0.088
50	Sn	0.002	66	Dy	0.009	82	Pb	0.032	98	Cf	0.093
51	Sb	0.002	67	Ho	0.010	83	Bi	0.034	99	Es	0.099
52	Te	0.003	68	Er	0.011	84	Po	0.037	100	Fm	0.106

第二节　X射线光谱定性及定量分析

一、定性分析

1. 莫斯莱定律

莫斯莱定律指出，特征X射线波长倒数的平方根与元素的原子序数呈线性关系，即

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}}=K(Z-S) \tag{10-13}$$

或

$$\lambda=k(Z-S)^{-2} \tag{10-14}$$

式中，λ为特征X射线或荧光X射线的波长；Z为元素的原子序数；K，k及S为常数，与谱线的线系有关。

莫斯莱定律是X射线光谱法定性分析的基础，只要测出特征X射线的波长，就可计算出原子序数。

2. 定性分析方法

X射线光谱定性分析包括试样的X射线光谱的记录和峰的识别。光谱的记录方法是，把试样放入X射线光谱仪的样品室，受初级X射线照射，发出次级X射线，其中含有试样各组成元素的特征线。次级线束经准直后，进行2θ扫描，最后记录的是强度随2θ角的变化曲线，实际上就是X射线光谱。先从X射线光谱图上找出各衍射峰的峰位2θ角，然后按所使用的分析晶体查找谱线-2θ表，通过查表便可迅速查得未知的分析元素。谱线-2θ表有两种类型，谱线→2θ表和2θ→谱线表。

（1）谱线→2θ表　此表的特点是元素特征谱线按原子序数增加的顺序排列，然后列出与元素相应的K系和L系特征线的2θ值。但表格型式又各有不同，有的谱线→2θ表按不同分析晶体制成专用表格，还有的表将各种分析晶体均列在同一表格内。

（2）2θ→谱线表　此表的特点是按波长（$n\lambda$）和2θ增加的顺序排列，便于根据实测的2θ值迅速鉴定未知元素。

表10-14为元素主要分析线-2θ表，表10-15、表10-16、表10-17、表10-18和表10-19依次为采用LiF、ADP、黄玉、NaCl和石英晶体的元素谱线-2θ表，表10-20为元素的特征X射线波长表。

二、定量分析

X射线光谱定量分析是测定试样中待测元素的特征谱线强度，并把强度转化为元素含量。X射线光谱法象大多数物理分析方法一样，需要与相应的纯物质或标样进行比较。下面介绍几种基本的定量分析方法。

1. 外标法

外标法是以试样中分析元素的分析线强度与外部标样中已知含量的这一元素的同一谱线强度相比较，来校正或测定试样中分析元素的含量。常用的外标法有下述三种：

（1）直接校正法　直接校正法是利用外部标样直接测定试样中分析元素的含量，是一种最简单的定量方法，但对分析条件的要求比较严格。它包括单标样法，双标样法和校准曲线法。

①单标样法　当试样x中的分析元素含量与标样s中的同一元素含量接近时，它们的分

表10-14 元素的主要分析线-2θ表[1]

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdt(020) 2d=8.803	石英(10$\bar{1}$1) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.750
12	Mg	K吸收限	0.9512	1.303	126.71	—	—	—	—		
		K_{β_1}	0.9558	1.297	127.83		—	—	—	—	—
		K_{α}	0.9885	1.254	136.61					—	—
13	Al	K吸收限	0.7951	1.559	96.63	129.17					130.65
		K_{β_1}	0.7981	1.553	97.17	130.59				—	131.69
		K_{α}	0.8339	1.487	103.14	142.58	—	—	—	—	144.64
14	Si	K吸收限	0.6745	1.837	78.63	100.53	—	—	—	—	120.85
		K_{β_1}	0.6768	1.832	78.90	150.50	—	—	—	—	121.36
		K_{α}	0.7125	1.740	84.08	108.08	—	—	—	—	109.04
15	P	K吸收限	0.5787	2.142	65.85	82.19	119.82	—		—	82.80
		K_{β_1}	0.5804	2.136	66.10	83.49	120.45	—	—	—	83.10
		K_{α_1}	0.6157	2.013	70.67	88.72	134.01	—	—		89.40
16	S	K吸收限	0.5018	2.470	56.27	69.51	97.87	—	—	—	69.99
		K_{β_1}	0.5032	2.464	56.43	69.72	97.62	126.25	—	—	70.21
		K_{α_1}	0.5372	2.307	60.63	75.21	106.02	144.47	—	—	75.73
17	Cl	K吸收限	0.4397	2.819	49.81	59.91	82.23	102.42		—	60.33
		K_{β_1}	0.4403	2.815	49.86	60.03	82.36	102.62			60.43
		K_{α_1}	0.4728	2.622	53.75	64.97	89.99	113.88	—	—	65.41
18	Ar	K吸收限	0.3871	3.202	42.96	52.17	70.75	86.65	—	—	52.71
		K_{β_1}	0.3886	3.190							
		K_{α_1}	0.4191	2.957	46.39	56.87	77.54	95.94			57.25
19	K	K吸收限	0.3437	3.606	37.58	45.96	61.86	75.08	117.17		46.25
		K_{β_1}	0.3454	3.589	37.88	46.20	62.20	75.51	118.17		46.56
		K_{α_1}	0.3741	3.313	41.16	50.30	68.05	81.00	136.59		50.55
20	Ca	K吸收限	0.3070	4.037	33.54	40.82	54.57	65.95	99.26	—	41.25
		K_{β_1}	0.3089	4.012	33.75	41.09	55.04	66.42	100.22	—	41.50
		K_{α}	0.3358	3.691	36.79	44.85	60.50	73.07	113.02	—	45.14
21	Sc	K吸收限	0.2757	4.495	30.03	36.51	48.71	58.57	86.45		36.74
		K_{β_1}	0.2780	4.460	30.28	36.81	49.13	59.04	87.30		37.04
		K_{α}	0.3031	4.090	33.10	40.28	53.92	65.01	96.66		40.54
22	Ti	K吸收限	0.2497	4.963	27.14	32.98	43.86	52.55	76.66	134.10	33.17
		K_{β_1}	0.2514	4.931	27.33	33.18	44.17	52.95	77.28	135.92	33.39
		K_{α_1}	0.2748	4.510	29.93	36.39	48.54	58.32	86.09		36.61
23	V	K吸收限	0.2269	5.462	24.62	29.87	39.68	47.44	68.62	113.58	30.05
		K_{β_1}	0.2285	5.427	24.79	30.08	39.95	47.78	69.12	114.47	30.27
		K_{α_1}	0.2505	4.952	26.93	33.04	43.96	52.69	76.85	134.57	33.25
24	Cr	K吸收限	0.2070	5.987	22.43	27.20	36.07	43.08	61.87	99.52	27.37

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.643	2θ EDdt(020) 2d=8.803	2θ 石英(1011) 2d=6.686	2θ NaCl(200) 2d=5.641	2θ LiF(200) 2d=4.027	2θ 黄玉(303) 2d=2.712	2θ PET 2d=8.750
24		K_{β_1}	0.2085	5.946	22.59	27.40	35.34	43.38	62.36	100.46	27.57
		K_{α_1}	0.2290	5.414	30.97	30.15	40.05	47.89	69.31	115.18	30.34
25	Mn	$K_{吸收限}$	0.1896	6.535	20.58	24.88	32.95	39.29	56.19	88.73	25.06
		K_{β_1}	0.1910	6.490	20.68	25.06	33.20	39.59	56.61	89.55	25.22
		K_{α_1}	0.2102	5.899	22.76	27.53	36.61	43.75	62.93	101.61	27.80
26	Fe	$K_{吸收限}$	0.1743	7.106	18.86	22.84	30.23	36.00	51.31	80.01	22.98
		K_{β_1}	0.1757	7.055	19.00	23.02	30.46	36.29	51.73	80.74	23.16
		K_{α_1}	0.1936	6.404	20.98	25.41	33.66	40.14	57.47	91.10	25.57
27	Co	$K_{吸收限}$	0.1608	7.707	17.36	21.05	27.83	33.13	47.08	72.71	21.18
		K_{β_1}	0.1621	7.649	17.52	21.22	28.06	33.39	47.47	73.40	21.35
		K_{α_1}	0.1789	6.930	19.35	23.45	31.04	36.98	52.75	82.54	23.59
28	Ni	$K_{吸收限}$	0.1488	8.329	16.05	19.46	25.72	30.59	43.37	66.55	19.58
		K_{β_1}	0.1500	8.264	16.21	19.62	25.93	30.84	43.74	67.15	19.74
		K_{α_1}	0.1658	7.478	17.92	21.71	28.71	34.18	48.62	75.37	21.84
29	Cu	$K_{吸收限}$	0.1380	8.978	14.91	18.04	23.83	28.32	40.10	61.22	18.15
		K_{β_1}	0.1392	8.905	15.03	18.20	24.04	28.58	40.45	61.77	18.31
		K_{α_1}	0.1540	8.047	16.65	20.16	26.64	31.70	44.99	69.23	20.28
30	Zn	$K_{吸收限}$	0.1283	9.657	13.85	16.76	22.13	26.30	37.17	56.48	16.87
		K_{β_1}	0.1295	9.572	13.98	16.92	22.34	26.55	37.53	57.06	17.03
		K_{α_1}	0.1435	8.638	15.50	18.77	24.79	29.48	41.76	63.90	18.89
31	Ga	$K_{吸收限}$	0.1196	10.365	12.92	15.61	20.60	24.47	34.55	52.32	15.71
		K_{β_1}	0.1208	10.264	13.03	15.77	20.81	24.72	34.91	52.89	15.87
		K_{α_1}	0.1340	9.251	14.47	17.51	23.12	27.48	38.88	59.22	17.62
32	Ge	$K_{吸收限}$	0.1117	11.100	12.04	14.57	19.23	22.83	32.22	48.62	14.66
		K_{β_1}	0.1129	10.982	12.16	14.74	19.41	23.09	32.56	49.30	14.82
		K_{α_1}	0.1254	9.885	13.53	16.38	21.62	25.69	36.25	55.08	16.46
		$L_{Ⅱ吸收限}$	0.994	1.248							
		L_{β_1}	1.0175	1.218	146.65	—	—	—	—	—	—
		L_{α}	1.0436	1.188	158.55	—	—				
33	As	$K_{吸收限}$	0.1045	11.860	11.27	13.63	17.98	21.35	30.08	45.33	13.72
		K_{β_1}	0.1057	11.725	11.40	13.80	18.22	21.61	30.44	45.89	13.88
		K_{α_1}	0.1175	10.543	12.68	15.35	20.26	24.06	33.96	51.39	15.45
		$L_{Ⅰ}$	0.8107	1.529	99.25	—	—	—	—		135.80
		$L_{Ⅱ吸收限}$	0.9124	1.358	118.01	—	—	—	—	—	—
		$L_{Ⅲ}$	0.9367	1.32	123.33		—				
		L_{β_1}	0.9414	1.317	124.41	—				—	—
		L_{α}	0.9671	1.283	130.68	—					

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdt(020) 2d=8.808	石英(10$\bar{1}$1) 2d=6.685	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	石英(203) 2d=2.712	PET 2d=8.750
34	Se	K吸收	0.0980	12.646	10.57	14.74	16.85	20.90	26.17	41.35	12.36
		K_{β_1}	0.0992	12.496	10.70	12.94	17.02	20.26	28.58	43.92	13.02
		K_α	0.1105	11.227	11.93	14.42	19.03	22.59	31.85	48.06	14.51
		L_I	0.7535	1.651	84.70	—	—	—	—	—	118.14
		L_{III}吸收	0.8419	1.473	104.53	145.39		—	—	—	158.23
		L_β	0.8645	1.43	108.50		—	—	—	—	162.28
		L_α	0.8749	1.419	110.34	165.81	—	—	—	—	175.43
		L_l	0.9930	1.375	115.30	—	—	—	—	—	—
35	Br	K吸收	0.0920	13.47	9.92	12.00	15.32	18.37	26.41	39.66	12.97
		K_{β_1}	0.0933	13.291	10.06	12.16	15.04	19.23	26.79	40.23	12.21
		K_α	0.1040	11.924	11.24	13.57	17.38	21.34	29.93	45.08	13.65
		L_{III}吸收	0.780	1.59	—	[illegible]	—	—	—	—	—
		L_{β_1}	0.8125	1.587	93.55	134.??	—	—	—	—	—
		L_α	0.8375	1.480	103.31	144.12	—	—	—	—	—
36	Kr	K吸收	0.0866	14.45	9.35	11.29	14.87	15.65	23.83	37.28	11.35
		K_{β_1}	0.0879	14.112	9.49	11.45	15.12	19.32	25.20	37.60	11.52
		K_α	0.0980	12.649	10.56	12.78	16.86	20.03	28.17	42.37	12.86
37	Rb	K吸收	0.0816	15.197	8.80	10.63	14.01	16.72	23.37	35.29	10.78
		K_{β_1}	0.0829	14.961	8.94	10.80	14.2?	16.36	23.75	35.58	10.82
		K_α	0.0926	13.395	9.96	12.07	15.91	18.39	26.58	39.61	12.1?
		L_I吸收	0.5557	2.066	76.63	—	127.53	—	—	—	85.5?
		L_{III}吸收	0.6043	1.865	73.20	97.39	157.03		—	—	94.80
		L_{II}	0.6663	1.80	90.82	—	—	—	—	—	101.37
		L_{β_1}	0.7076	1.752	83.3?	128.98		—	—	—	107.93
		L_{α_1}	0.7318	1.694	86.86	112.47	—	—	—	—	113.51
38	Sr	K吸收	0.0770	16.101	8.30	10.03	15.22	15.98	22.49	33.38	10.08
		K_{β_1}	0.0784	15.835	8.44	10.20	13.4?	15.95	22.42	33.56	10.27
		K_{α_1}	0.0875	14.165	9.43	11.41	15.04	17.95	25.31	37.85	11.49
		L_I	0.5582	2.220	65.20	78.72	103.20	138.49	—	—	73.29
		L_{III}吸收	0.6172	2.008	70.90	95.24	134.73	—		—	85.73
		L_β	0.6387	1.940	73.75	93.42	145.53	—	—	—	90.70
		L_{β_1}	0.6624	1.872	76.56	97.60	156.31	—	—	—	95.42
		L_α	0.6863	1.806	80.11	122.44	—	—	—	—	102.31
39	Y	K吸收	0.0728	17.032	7.84	9.48	12.50	14.83	20.82	31.18	9.64
		K_{β_1}	0.0740	16.737	7.95	9.65	12.72	15.09	21.20	31.70	9.71
		K_{α_1}	0.0832	14.958	8.92	10.80	14.22	16.90	23.75	35.59	10.87
		L_I	0.5332	2.309	59.95	72.53	102.93	130.10	—	—	73.4?

续表

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	θ ADP(101) 2d=10.642	EDDT(020) 2d=8.808	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.742
39		L_{III}吸收限	0.5755	2.153	65.43	81.65	115.32	—		—	82.25
		L_1	0.5952	2.079	68.14	85.26	126.17	—	—	—	85.90
		$L\alpha_1$	0.6212	1.995	71.42	89.76	138.57			·	90.46
		L_{γ_1}	0.6449	1.922	74.59	94.23	149.35	—	—	—	94.95
40	Zr	K吸收限	0.0689	17.998	7.42	8.48	11.83	14.03	19.70	25.43	9.03
		$K\beta_1$	0.0702	17.668	7.56	9.14	12.05	14.25	20.07	29.93	9.20
		$K\alpha_1$	0.0786	15.775	8.47	10.29	13.50	16.02	22.51	33.60	10.31
		L_I	0.4867	2.543	54.13	57.13	93.43	115.27	—	—	67.59
		L_{III}吸收限	0.5378	2.307	60.71	75.31	107.09	144.86	—	—	75.85
		L_1	0.5583	2.220	63.38	75.72	113.23	165.52	—		70.29
		$L\beta$	0.5836	2.124	66.31	81.07	121.57	—			83.06
		$L\alpha_1$	0.6070	2.042	69.30	87.18	130.43				87.65
41	Nb	K吸收限	0.0653	18.981	7.05	8.52	11.21	13.29	18.66	27.85	8.56
		$K\beta_1$	0.0665	18.622	7.17	8.67	11.43	13.56	19.03	28.42	8.73
		$K\alpha$	0.0746	16.615	8.03	9.73	12.81	15.22	21.56	31.94	9.78
		L_I	0.4581	2.705	50.59	62.72	86.49	108.65			63.14
		L_{III}吸收限	0.5026	2.467	—	—		—	—		—
		L_1	0.5222	2.373	58.76	72.58	102.92	135.51	—	—	73.29
		$L\beta$	0.5492	2.257	62.14	77.20	110.45	153.31			77.76
		$L\alpha_1$	0.5724	2.166	65.08	81.12	117.58				81.71
42	Mo	K吸收限	0.0620	19.996	6.68	8.07	10.64	12.62	17.71	26.42	8.12
		$K\beta_1$	0.0632	19.606	6.81	8.24	10.85	12.87	18.07	26.95	8.29
		$K\alpha$	0.0709	17.479	7.64	9.24	12.18	14.45	20.29	30.42	9.30
		L_I	0.4298	2.883	47.65	58.46	80.01	99.26		—	58.84
		L_{III}吸收限	0.4718	2.627	52.63	64.82	89.79	117.37			65.29
		L_1	0.4912	2.523	54.99	67.84	94.57	121.12	—	·	68.31
		$L\beta_1$	0.5177	2.395	58.21	72.04	101.47	133.19	—	·	72.55
		$L\alpha$	0.5406	2.293	61.06	75.78	107.9	146.82		—	76.32
43	Tc	K吸收限	0.0589	21.054		—		·	·		
		$K\beta_1$	0.0601	20.619	6.48	7.85	10.34	12.26	17.20	25.65	7.89
		$K\alpha_1$	0.0675	18.367	7.28	8.77	11.56	13.71	19.25	28.75	8.83
44	Ru	K吸收限	0.0561	22.112	6.04	7.30	9.62	11.40	16.00	23.85	7.35
		$K\beta_1$	0.0572	21.656	6.17	7.46	9.82	11.65	16.35	24.37	7.50
		$K\alpha_1$	0.0643	19.279	6.93	8.38	11.05	13.09	18.38	27.41	8.43
		L_{III}吸收限	0.4250	2.965	46.25	56.59	77.32	95.62	—	—	57.07
		L_1	0.4369	2.837	48.48	59.71	81.62	108.52		·	59.94
		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]		—	[illegible]

续表

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdt(020) 2d=8.803	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.640	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.750
44		L_{α_1}	0.4846	2.558	54.17	66.79	92.89	118.4?	—	—	67.25
45	Rh	$K_{吸收限}$	0.0534	23.217	5.75	6.95	9.16	10.84	15.24	22.70	6.99
		K_{β_1}	0.0546	22.723		7.11	9.38	11.10	15.57	23.21	7.17
		K_{α}	0.0613	20.216		7.99	10.52	12.48	17.52	26.14	8.04
		$L_{Ⅰ}$	0.3626	3.418	39.54	45.65	65.65	80.00	129.44	—	48.96
		$L_{Ⅱ吸收限}$	0.3942	3.144	43.49	53.21	72.26	88.67	158.49	—	53.56
		$L_{Ⅲ}$	0.4129	3.003	45.87	55.95	76.79	94.32			56.32
		L_{β_1}	0.4374	2.834	48.54	59.60	81.51	101.69	—	—	59.99
		L_{α_1}	0.4597	2.696	51.19	62.97	86.88	106.17	—	—	63.39
46	Pd	$K_{吸收限}$	0.0509	24.341	5.45	6.63	8.73	10.35	14.53	21.64	6.67
		K_{β_1}	0.0521	23.819		6.79	8.93	10.59	14.87	22.13	6.82
		K_{α}	0.0585	21.177		7.63	10.05	11.91	16.72	24.93	7.67
		$L_{Ⅰ}$	0.3428	3.616	37.38	45.83	61.66	74.83	116.69	—	46.12
		$L_{Ⅱ吸收限}$	0.3724	3.328	40.96	50.05	67.35	82.68	135.27		50.47
		$L_{Ⅲ}$	0.3908	3.171	43.29	52.71	71.34	87.70	152.12		53.05
		L_{β_1}	0.4146	2.990	45.66	56.13	76.64	94.61			56.57
		L_{α_1}	0.4368	2.838	48.46	59.49	81.57	101.49	—	—	59.89
47	Ag	$K_{吸收限}$	0.0486	25.529	5.23	6.33	8.33	9.88	13.88	20.67	6.37
		K_{β_1}	0.0497	24.942	5.35	6.47	8.53	10.11	14.19	21.13	6.51
		K_{α}	0.0559	22.163	6.03	7.29	9.60	11.39	15.97	23.81	7.33
		$L_{Ⅰ}$	0.3254	3.809	35.61	43.30	58.24	70.45	107.82	—	43.56
		$L_{Ⅱ吸收限}$	0.3514	3.527	38.56	47.05	63.41	77.08	121.53		47.35
		$L_{Ⅲ}$	0.3698	3.351	40.67	49.63	67.16	81.93	133.42		50.02
		L_{β_1}	0.3934	3.151	43.40	53.10	72.03	88.45	155.42		53.44
		L_{α_1}	0.4154	2.984	45.95	56.32	76.62	94.35	—	—	56.59
48	Cd	$K_{吸收限}$	0.0464	26.711	5.00	6.04	7.96	9.44	13.24	19.71	6.08
		K_{β_1}	0.0475	26.095		6.19	8.15	9.65	13.55	20.18	6.22
		K_{α}	0.0535	23.173	—	6.97	9.18	10.89	15.27	22.75	7.01
		$L_{Ⅰ}$	0.3084	4.018	33.70	41.02	54.95	66.42	99.99		41.26
		$L_{Ⅱ吸收限}$	0.3326	3.726	36.42	44.39	59.58	72.25	111.35		44.68
		$L_{Ⅲ}$	0.3504	3.537	38.45	46.91	63.21	76.89	120.95		47.21
		L_{β_1}	0.3738	3.316	41.13	50.26	67.98	83.01	136.35	—	50.55
		L_{α_1}	0.3956	3.133	43.65	53.41	72.56	89.07	156.54		53.76
49	In	$K_{吸收限}$	0.0444	27.920	4.78	5.78	7.61	9.03	12.65	18.84	5.82
		K_{β_1}	0.0455	27.276		5.92	7.80	9.21	12.96	19.30	5.96
		K_{α}	0.0513	24.230	—	6.67	8.79	10.42	14.61	21.77	6.71
		$L_{Ⅰ}$	0.2926	4.236	31.91	38.82	51.90	62.48	93.20		39.07

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 V/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdt(020) 2d=8.803	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.750
49		L_{III}吸收边	0.3147	3.938	34.40	41.89	56.15	67.82	102.80		42.18
		L_{β_2}	0.3324	3.728	36.41	44.34	59.63	72.22	111.30	—	44.66
		L_{β_1}	0.3555	3.487	39.51	47.64	64.24	78.34	123.09		47.95
		L_{α}	0.3772	3.287	41.52	50.74	68.68	83.98	139.52		51.07
50	Sn	K吸收边	0.0425	29.192	4.57	5.53	7.28	8.64	12.11	18.02	5.58
		K_{β}	0.0435	28.486		5.67	7.46	8.85	12.41	18.47	5.70
		K_{α_1}	0.0491	25.271	—	6.30	8.42	9.98	14.00	20.84	6.43
		L	0.2777	4.460	33.26	36.78	49.06	58.98	97.81		37.61
		L_{III}吸收边	0.2983	4.156	33.55	39.61	52.06	58.83	95.57		39.88
		L_{β}	0.3150	3.937	41.20	42.03	55.81	68.04	103.21	—	42.25
		L_{β_1}	0.3385	3.663	37.09	45.23	59.85	73.71	114.40		45.52
		L_{α_1}	0.3600	3.444	39.54	48.28	65.13	79.31	126.76		48.55
51	Sb	K吸收边	0.0407	30.477	4.38	5.30	6.97	8.27	11.59	17.25	5.33
		K_{β_1}	0.0417	29.725		5.43	7.15	8.48	11.89	17.60	5.46
		K_{α_1}	0.0470	26.359		6.13	8.07	9.57	13.42	19.97	6.16
		L	0.2639	4.695	28.72	34.90	46.56	55.60	81.92	153.43	35.11
		L吸收边	0.2830	4.380	30.84	37.50	50.08	60.22	89.29		37.74
		L	0.3000	4.131	32.75	39.85	53.32	54.26	96.32	—	40.13
		L_{β}	0.3226	3.843	35.29	42.99	57.65	59.75	106.46		43.26
		L_{α_1}	0.3435	3.604	37.71	45.99	61.91	75.18	117.32	—	46.29
52	Te	K吸收边	0.0390	31.800	4.20	5.07	6.68	7.92	11.11	16.53	5.11
		K_{β_1}	0.0400	30.996	—	5.21	6.86	8.13	11.40	16.96	5.21
		K_{α}	0.0451	27.472	—	5.88	7.74	9.18	12.87	19.15	5.91
		L	0.2510	4.937	27.29	33.14	44.11	52.85	77.14	135.62	33.25
		L吸收边	0.2687	4.611	29.25	35.55	47.40	56.90	83.73	164.56	35.27
		L	0.2855	4.340	31.12	37.86	50.56	60.82	90.32		38.05
		L_{β_1}	0.3027	4.025	33.01	40.91	54.75	66.10	99.65		41.17
		L_{α_1}	0.3290	3.768	36.01	43.88	58.99	71.33	109.54	—	44.16
53	I	K吸收边	0.0374	33.155	4.03	4.67	6.41	7.60	10.65	15.84	
		K_{β_1}	0.0384	32.294	—	5.00	6.58	7.80	10.94	16.28	
		K_{α}	0.0433	28.612	—	5.64	7.42	8.81	12.35	18.39	
		L	0.2389	5.186	25.81	31.45	41.86	50.11	72.77	123.46	31.55
		L吸收边	0.2559	4.853	27.76	33.71	44.89	53.81	78.83	140.52	33.82
		L	0.2719	4.557	29.61	35.99	48.00	57.64	84.96	—	36.21
		L_{β_1}	0.2937	4.220	32.09	38.98	52.12	62.76	93.68		39.29
		L_{α_1}	0.3149	3.937	34.47	41.91	56.13	67.65	102.97	—	42.18
54	Xe	K吸收边	0.0358	34.572			6.15	7.29	10.22	15.19	—

续表

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdT(020) 2d=8.808	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	石英(502) 2d=2.712	PET 2d=8.750
54		K_{β}	0.0365	33.624		—	6.37	7.49	10.50	15.62	—
		K_{α}	0.0416	29.779	—		7.12	8.46	11.66	17.63	—
		L_{I}	0.2273	5.451	24.67	35.94	39.75	47.54	68.76	113.94	30.13
		L_{II}吸收限	0.2429	5.102	26.39	32.03	42.60	51.01	74.70	127.18	32.23
		L_{III}	0.2592	4.782	28.20	34.25	45.63	54.72	80.15	145.85	34.47
55	Cs	K吸收限	0.0345	35.949	—	—	5.91	7.01	9.92	14.61	
		K_{β_1}	0.0354	34.987	—		6.08	7.20	10.13	15.02	—
		K_{α_1}	0.0400	30.972	—		6.86	8.14	11.41	16.97	—
		L_{I}	0.2167	5.719	23.50	28.50	37.83	45.19	65.12	106.09	28.65
		L_{II}吸收限	0.2314	5.356	25.13	30.48	40.49	46.42	70.14	117.11	30.67
		L_{III}	0.2474	5.010	26.88	32.64	43.40	52.02	75.61	131.62	32.05
		L_{β_1}	0.2683	4.619	29.21	35.50	47.33	56.91	83.43	160.05	35.72
		L_{α_1}	0.2892	4.286	31.54	38.36	51.28	61.82	91.87	—	38.52
56	Ba	K吸收限	0.0331	37.450	—		5.68	6.74	9.44	14.04	
		K_{β_1}	0.0341	36.376	—	—	5.84	6.93	9.71	14.44	
		K_{α_1}	0.0385	32.193	—	—	6.60	7.83	10.98	16.33	
		L_{I}	0.2067	5.994	22.41	27.17	36.03	43.01	61.79	99.30	27.34
		L_{II}吸收限	0.2204	5.622	23.91	29.00	38.50	45.01	66.39	108.75	29.13
		L_{III}	0.2363	5.245	25.66	31.14	41.39	49.62	71.86	121.20	31.33
		L_{β_1}	0.2568	4.828	27.92	33.91	45.18	54.17	79.22	142.41	31.17
		L_{α_1}	0.2776	4.466	30.25	36.75	49.05	58.94	87.16		36.98
57	La	K吸收限	0.0318	38.299			—	5.47	9.06	13.47	
		K_{β_1}	0.0328	37.801		—	—	5.67	9.34	13.89	—
		K_{α_1}	0.0371	33.442	—	—		7.54	10.56	15.71	
		L_{I}	0.1973	6.282	21.37	25.92	31.32	40.99	58.67	93.25	27.05
		L_{II}吸收限	0.2103	5.893	22.80	27.64	36.67	43.75	62.57	101.70	27.82
		L_{III}	0.2258	5.483	24.50	29.73	39.48	47.20	68.22	112.75	29.91
		L_{β_1}	0.2458	5.042	26.71	32.43	43.14	51.67	75.25	130.92	32.63
		L_{α_1}	0.2665	4.651	29.01	35.25	46.93	56.50	82.68	158.55	35.47
58	Ce	K吸收限	0.0307	40.438	—		—	6.23	8.73	12.98	
		K_{β_1}	0.0316	39.257			—	6.42	9.00	13.37	—
		K_{α_1}	0.0357	34.719	—	—		7.26	10.17	15.13	
		L_{I}	0.1889	6.554	20.45	24.79	32.83	39.14	55.97	88.32	24.94
		L_{II}吸收限	0.2011	6.163	21.78	26.43	35.00	41.77	59.61	95.71	26.57
		L_{III}	0.2164	5.727	23.48	28.46	37.77	45.11	65.01	105.86	28.64
		L_{β_1}	0.2356	5.262	25.58	31.04	41.28	49.37	71.61	120.63	31.23
		L_{α_1}	0.2561	4.840	27.85	33.83	45.05	54.00	79.10	141.60	34.09

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.640	EDdT(020) 2d=8.808	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	石英(502) 2d=2.750	PET 2d=8.750
59	Pr	K吸收限	0.0285	41.988				6.05	8.41	13.59	
		K_{β_1}	0.0304	40.748	—	—	—	6.19	8.67	13.83	
		K_{α_1}	0.0344	36.026	—	—	—	6.95	9.80	14.58	
		L_{γ_1}	0.1911	6.488	19.59	23.74	31.49	37.45	53.45	83.78	25.85
		L_{III}吸收限	0.1924	6.441	20.83	25.29	33.49	39.56	57.08	90.38	25.40
		L_{β_2}	0.2077	5.967	22.51	27.29	36.25	43.21	62.10	99.97	27.16
		L_{β_1}	0.2250	5.489	24.31	29.73	39.49	47.20	68.23	112.77	29.93
		L_{α_1}	0.2463	5.033	26.76	32.49	43.22	51.77	75.41	130.43	32.59
60	Nd	K吸收限	0.0285	43.559	—	—	—	5.79	8.10	12.04	—
		K_{β_1}	0.0293	42.271			—	5.98	8.35	12.42	—
		K_{α_1}	0.0332	37.361			—	6.74	9.45	14.05	—
		L_{γ_1}	0.1735	7.146	16.77	22.74	30.48	35.83	51.05	79.56	22.88
		L_{III}吸收限	0.1843	6.725	19.04	24.17	32.06	38.14	54.47	85.61	24.52
		L_{β_2}	0.1995	6.213	21.61	26.19	34.78	41.42	59.80	95.70	26.35
		L_{β_1}	0.2167	5.721	23.49	28.50	37.81	45.17	65.10	106.05	28.97
		L_{α_1}	0.2370	5.230	25.74	31.24	41.52	49.69	72.11	121.84	31.43
61	Pm	K_{β_1}	0.0283	43.826			—	5.75	8.03	11.94	—
		K_{α_1}	0.0320	38.724	—	—	—	6.52	9.14	13.58	—
		L_{β_1}	0.2080	5.961	22.56	27.35	36.37	43.30	62.78	100.21	27.72
		L_{α_1}	0.2282	5.432	24.77	30.06	39.92	47.74	69.07	114.54	30.24
62	Sm	K吸收限	0.0265	46.833	—	—	—	5.38	7.54	11.20	—
		K_{β_1}	0.0275	45.413	—	—		5.55	7.78	11.55	—
		K_{α_1}	0.0309	40.118				6.28	8.80	13.09	
		L_{γ_1}	0.1598	7.758	17.26	20.93	27.67	32.83	46.73	72.24	21.55
		L_{III}吸收限	0.1703	7.279	18.41	22.30	29.54	35.13	50.02	78.77	22.44
		L_{β_2}	0.1844	6.729	19.96	24.19	32.03	38.17	54.53	86.71	24.34
		L_{β_1}	0.1998	6.205	21.64	26.23	34.77	41.48	59.38	95.44	26.39
		L_{α_1}	0.2199	5.636	23.86	28.94	38.41	45.90	66.23	108.30	29.13
63	Eu	K吸收限	0.0256	48.301	—	—	—	5.19	7.28	10.81	—
		K_{β}	0.0264	47.006	—	—	—	5.38	7.51	11.15	—
		K_{α_1}	0.0298	41.542	—	—	—	6.07	8.50	12.51	—
		L_{γ_1}	0.1496	8.086	16.60	20.10	26.57	31.61	44.85	68.92	20.23
		L_{III}吸收限	0.1526	7.921	17.58	21.29	28.15	33.51	47.63	73.59	21.42
		L_{β_2}	0.1625	6.981	19.21	23.27	30.79	36.69	52.32	81.79	23.41
		L_{β_1}	0.1920	6.456	20.79	25.20	33.35	39.80	56.06	90.15	25.25
		L_{α_1}	0.2121	5.845	22.99	27.88	36.95	44.10	63.59	102.87	28.05
64	Gd	K吸收限	0.0247	50.225				5.02	7.03	10.44	—

续表

原子序	元 素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdt(020) 2d=8.803	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.750
64		K_{β_1}	0.0254	48.697	—	—	—	5.17	7.25	10.77	
		K_{α_1}	0.0288	42.996	—	-	—	5.66	8.21	12.21	—
		L_I	0.1477	8.391	15.96	19.82	25.52	30.36	43.04	66.00	19.44
		L_{II}吸收限	0.1561	7.938	16.87	20.43	27.01	32.13	45.63	70.29	20.56
		L_{III}	0.1709	7.250	18.49	22.39	29.63	35.26	50.24	78.15	22.53
		L_{β_1}	0.1846	6.713	19.98	24.81	32.05	38.21	54.58	85.91	24.36
		L_{α_1}	0.2046	6.057	22.17	26.68	35.61	42.55	61.08	97.55	27.05
65	Tb	K吸收限	0.0233	51.984				4.64	6.79	10.09	—
		K_{β_1}	0.0248	50.382	—	—	—	5.00	7.01	10.41	—
		K_{α_1}	0.0278	44.481	—	—		5.67	7.94	11.69	·
		L_I	0.1421	8.722	15.35	18.58	24.54	29.18	41.33	63.20	18.69
		L_{II}吸收限	0.1501	8.256	16.22	19.64	25.95	30.87	43.78	67.22	19.76
		L_{III}	0.1649	7.517	17.83	21.59	28.55	33.99	48.34	74.88	21.72
		L_{β_1}	0.1776	6.978	19.22	23.28	30.81	36.71	52.35	81.83	23.43
		L_{α_1}	0.1976	6.272	21.40	25.94	34.37	41.00	58.76	93.51	26.10
66	Dy	K吸收限	0.0231	53.778					6.55	9.75	·

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdt(020) 2d=8.808	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.750
69		K_{β_1}	0.0215	57.517	—	—		—	6.13	9.11	
		K_{α_1}	0.0244	50.741	—	—	—	—	6.96	10.34	—
		L_{γ_1}	0.1222	10.141	13.19	15.96	21.08	25.02	35.33	53.57	16.06
		L_I吸收限	0.1288	9.626	13.90	16.82	22.30	26.39	37.29	56.56	16.92
		L_{β_2}	0.1433	8.652	15.48	18.73	24.75	29.43	41.69	63.78	18.85
		L_{β_1}	0.1530	8.101	16.53	20.02	26.45	31.47	44.56	68.58	20.14
		L_{α_1}	0.1728	7.180	18.67	22.62	29.92	35.64	50.77	79.27	22.75
70	Yb	K吸收限	0.0202	61.332	—	—	—	—	5.76	8.55	
		K_{β_1}	0.0209	59.37	—	—	—	—	5.94	8.83	—
		K_{α_1}	0.0237	52.389			—		6.74	10.02	—
		L_{γ_1}	0.1182	10.487	12.75	15.43	20.36	24.19	34.13	51.87	15.53
		L_I吸收限	0.1243	9.972	13.41	16.25	21.42	25.45	35.95	54.55	16.33
		L_{β_2}	0.1385	8.941	14.97	18.12	23.93	28.45	40.27	61.47	18.23
		L_{β_1}	0.1476	8.402	15.94	19.30	25.50	30.33	42.99	65.92	19.42
		L_{α_1}	0.1672	7.415	18.08	21.90	28.96	34.48	49.06	76.12	22.03
71	Lu	K吸收限	0.0195	63.281			—		5.58	8.26	—
		K_{β_1}	0.0202	61.283	—	—	—	—	5.75	8.55	—
		K_{α_1}	0.0229	54.069	—	—	—	—	6.53	9.72	
		L_{γ_1}	0.1140	10.870	12.30	14.88	19.64	23.32	32.89	49.72	14.97
		L_I吸收限	0.1192	10.341	12.93	15.65	20.65	24.53	34.53	52.45	15.74
		L_{β_2}	0.1341	9.239	14.48	17.53	23.15	27.51	38.92	59.28	17.64
		L_{β_1}	0.1423	8.708	15.37	18.61	24.58	29.23	41.40	63.32	18.73
		L_{α_1}	0.1619	7.655	17.51	21.20	28.03	33.37	47.43	73.32	21.33
72	Hf	K吸收限	0.0190	65.292			—		5.40	8.03	—
		K_{β_1}	0.0196	63.234	—				5.57	8.27	—
		K_{α_1}	0.0222	55.790	—	—	—	—	6.33	9.40	—
		L_{γ_1}	0.1099	11.271	11.86	14.35	18.93	22.48	31.69	47.64	14.44
		L_I吸收限	0.1155	10.732	—	15.06	19.89	23.63	33.35	50.40	15.17
		L_{β_2}	0.1297	9.554	—	16.95	22.37	26.59	37.58	57.15	17.05
		L_{β_1}	0.1374	9.022	14.84	17.96	23.72	28.20	39.90	60.68	18.07
		L_{α_1}	0.1570	7.899	16.96	20.54	27.15	32.31	45.88	70.72	20.67
73	Ta	K吸收限	0.0184	67.379					5.24	7.78	—
		K_{β_1}	0.0190	65.223	—	—	—	—	5.41	8.04	—
		K_{α_1}	0.0215	57.532	—	—	—	—	6.14	9.11	
		L_{γ_1}	0.1061	11.681	11.44	13.84	18.26	21.68	30.55	46.06	13.93
		L_I吸收限	0.1114	11.129	12.01	14.54	19.19	22.77	32.11	48.49	14.62
		L_{β_2}	0.1265	9.874	13.60	16.39	21.54	25.71	36.32	55.14	16.46
		L_{β_1}	0.1327	9.343	14.33	17.34	22.89	27.21	38.48	58.50	17.45
		L_{α_1}	0.1522	8.146	16.44	19.91	26.31	31.30	44.41	68.27	20.03
74	W	K吸收限	0.0178	69.479	—	—	—	—	5.08	7.54	—
		K_{β_1}	0.0184	67.244					5.25	7.80	—

续表

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdt(020) 2d=8.803	石英(10$\bar{1}$1) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.750
74		K_{α_1}	0.0209	59.318	—	—	—	—	5.99	8.84	
		L_I	0.1024	12.097	11.05	13.37	17.63	20.98	29.48	44.39	13.45
		L_{II}吸收边	0.1073	11.543	11.59	14.02	18.57	21.96	30.96	45.63	14.11
		L_{III}	0.1215	10.198	11.13	15.87	20.95	24.89	35.14	53.25	15.97
		L_{β_1}	0.1282	9.672	13.81	16.74	22.10	26.27	37.12	56.41	15.85
		L_{α_1}	0.1476	8.397	15.96	19.31	25.51	30.34	43.02	65.96	19.41
75	Re	K吸收边	0.0173	71.500	—	—	—	—	4.93	7.38	2.27
		K_{β_1}	0.0179	69.310	—	—	—	—	5.20	7.58	
		K_{α_1}	0.0203	61.140	—	—	—	—	5.77	8.59	—
		L_I	0.0990	12.524	10.67	12.91	17.02	20.21	28.46	42.80	12.99
		L_{II}吸收边	0.1037	11.953	11.15	13.53	17.84	21.18	29.84	44.93	13.61
		L_{III}	0.1177	10.530	12.72	15.37	20.25	24.09	33.99	51.44	15.45
		L_{β_1}	0.1239	10.010	13.37	16.18	21.35	25.37	35.83	54.35	16.27
		L_{α_1}	0.1433	8.652	15.48	18.74	24.75	29.43	41.69	63.76	18.84
76	Os	L_I	0.0956	12.968	10.30	12.46	16.44	19.51	27.46	41.27	12.54
		L_{II}吸收边	0.1001	12.380	10.78	13.06	17.22	20.44	28.79	43.32	13.14
		L_{III}	0.1140	10.870	12.30	14.90	19.64	23.33	32.90	49.73	14.98
		L_{β_1}	0.1197	10.355	12.92	15.63	20.63	24.51	34.59	52.35	15.73
		L_{α_1}	0.1391	8.911	15.02	18.19	24.02	28.55	40.42	61.72	18.30
77	Ir	L_I	0.0923	13.427	9.95	12.04	15.87	18.53	26.50	39.80	12.11
		L_{II}吸收边	0.0967	12.819	10.43	12.61	16.63	19.74	27.79	41.78	12.66
		L_{III}	0.1105	11.209	11.93	14.43	19.04	22.61	31.87	48.12	14.52
		L_{β_2}	0.1135	10.920	12.25	14.82	19.55	23.22	32.75	49.50	14.91
		L_{β_1}	0.1158	10.708	12.49	15.12	19.94	23.69	33.42	50.55	15.21
		L_{α_1}	0.1351	9.175	14.58	17.66	23.32	27.72	39.22	59.77	17.77
78	Pt	L_I	0.0893	13.875	9.63	11.65	15.35	18.22	25.63	38.46	11.72
		L_{II}吸收边	0.0934	13.268	10.07	12.18	16.06	19.07	26.83	40.29	12.26
		L_{III}	0.1072	11.556	11.57	13.99	18.46	21.92	30.89	46.58	14.08
		L_{β_2}	0.1102	11.250	11.89	14.38	18.97	22.53	31.76	47.95	14.47
		L_{β_1}	0.1120	11.070	12.08	14.62	19.28	22.90	32.29	48.78	14.71
		L_{α_1}	0.1313	9.442	14.17	17.16	22.65	26.92	38.08	57.91	17.26
79	Au	L_I	0.0863	14.354	9.31	11.25	14.84	17.61	24.76	37.13	11.33
		L_{II}吸收边	0.0904	13.731	9.73	11.77	15.52	18.41	25.91	38.88	11.84
		L_{III}	0.1040	11.917	11.22	13.57	17.90	21.25	29.95	45.10	13.65
		L_{β_2}	0.1070	11.580	11.54	13.97	18.43	21.87	30.83	46.48	14.05
		L_{β_1}	0.1084	11.442	11.69	14.14	18.65	22.15	31.22	47.10	14.23
		L_{α_1}	0.1276	9.713	13.78	16.67	22.01	26.15	36.95	56.15	16.78
80	Hg	L_I	0.0835	14.837	9.00	10.89	14.35	17.03	23.94	35.88	10.96
		L_{II}吸收边	0.0872	14.210	9.40	11.37	14.99	17.79	25.02	37.52	11.44
		L_{β_2}	0.1040	11.924	11.21	13.57	17.89	21.24	29.93	45.08	13.75
		L_{β_1}	0.1049	11.822	11.31	13.68	18.05	21.43	30.19	45.49	13.77
		L_{α_1}	0.1241	9.989	13.39	16.21	21.40	25.42	35.92	54.47	16.31

续表

原子序	元素	谱线名称	λ/nm	激发电势 E/keV	2θ ADP(101) 2d=10.642	EDdT(020) 2d=8.808	石英(1011) 2d=6.686	NaCl(200) 2d=5.641	LiF(200) 2d=4.027	黄玉(303) 2d=2.712	PET 2d=8.750
81	Tl	L_I	0.0808	15.338	8.71	10.53	13.88	16.47	23.15	34.67	10.60
		L_{II}吸收限	0.0843	14.656	9.09	11.00	14.46	17.20	24.18	36.21	11.06
		L_{III}	0.0975	12.655	10.56	12.77	16.81	19.99	28.15	42.34	12.85
		L_{β_2}	0.1010	12.271	10.90	13.16	17.36	20.64	29.06	43.74	13.26
		L_{β_1}	0.1015	12.213	10.95	13.24	17.47	20.74	29.21	43.97	13.33
		L_{α_1}	0.1207	10.268	13.03	15.77	20.81	24.77	34.90	52.57	15.86
82	Pb	L_I	0.0781	15.878	8.42	10.19	13.42	15.55	22.38	33.50	10.25
		L_{II}吸收限	0.0815	15.205	8.79	10.63	14.00	16.62	23.38	34.98	10.69
		L_{III}	0.0950	13.041	10.25	12.39	16.34	19.40	27.30	41.02	12.17
		L_{β_2}	0.0982	12.622	10.60	12.82	16.91	20.07	28.26	42.50	12.50
		L_{β_1}	0.0982	12.613	10.59	12.81	16.89	20.05	28.24	42.47	12.49
		L_{α_1}	0.1175	10.551	12.68	15.34	20.24	24.05	33.93	51.05	15.41
83	Bi	L_I	0.0757	16.376	8.16	9.85	13.00	15.42	21.67	32.41	9.92
		L_{II}吸收限	0.0789	15.713	8.50	10.28	13.55	16.07	22.60	33.81	10.34
		L_{III}	0.0924	13.422	9.96	12.04	15.88	18.84	26.51	39.81	12.12
		L_{β_2}	0.0955	12.980	10.30	12.45	16.43	19.50	27.44	41.24	12.53
		L_{β_1}	0.0952	13.023	10.26	12.42	16.37	19.42	27.35	41.10	12.49
		L_{α_1}	0.1144	10.839	12.34	14.93	19.70	23.40	32.91	49.55	15.02
84	Po	L_{β_1}	0.0922	13.447	9.94	12.03	15.86	18.82	26.48	39.76	12.10
		L_{β_2}	0.0929	13.340	10.02	12.12	15.98	18.96	26.59	40.05	12.19
		L_{α_1}	0.1114	11.130	12.01	14.54	19.18	22.77	32.01	48.30	14.63
87	Fr	L_{β_1}	0.0840	14.770	9.05	10.95	14.43	17.12	24.07	36.07	11.01
		L_{β_2}	0.0858	14.45	9.25	11.18	14.74	17.49	24.60	36.88	11.25
		L_{α_1}	0.1030	12.031	11.11	13.44	17.72	21.04	29.64	44.55	13.52
88	Ra	L_I吸收限	0.0644	19.229	6.94	8.40	11.06	13.12	18.42	27.60	8.45
		L_{β_1}	0.0814	15.236	8.77	10.61	13.98	16.55	23.32	34.82	10.67
		L_{β_2}	0.0835	14.841	9.00	10.89	14.35	17.03	23.95	35.92	10.96
		L_{α_1}	0.1005	12.335	10.83	13.11	17.28	20.52	28.90	43.49	13.19
90	Th	L_I吸收限	0.0606	19.843	6.53	7.89	10.40	12.33	17.30	25.91	7.94
		L_{β_1}	0.0765	16.202	8.25	9.97	10.91	15.59	21.91	32.78	10.03
		L_{β_2}	0.0794	15.623	8.55	10.34	13.14	16.17	22.73	34.03	10.41
		L_{α_1}	0.0956	12.968	10.31	12.47	13.03	19.51	27.47	41.38	12.54
91	Pa	L_{β_1}	0.0742	16.702	8.00	9.67	12.75	15.12	21.24	31.77	9.73
		L_{β_2}	0.0774	16.024	8.34	10.08	13.29	15.77	22.15	33.15	10.15
		L_{α_1}	0.0933	13.290	10.06	12.17	16.04	19.04	26.79	40.25	12.24
92	U	L_I吸收限	0.0569	21.764	6.13	7.42	9.77	11.60	16.26	24.24	7.46
		L_{β_1}	0.0720	17.220	7.76	9.38	12.36	14.67	20.60	30.71	9.44
		L_{β_2}	0.0755	16.428	8.15	9.84	12.96	15.38	21.60	30.79	9.90
		L_{α_1}	0.0911	13.614	9.82	11.87	15.55	18.56	26.14	39.21	11.95
93	Np	L_{β_1}	0.0698	17.750	7.52	9.09	11.98	14.21	19.96	29.82	9.15
		L_{β_2}	0.0736	16.840	7.93	9.59	12.63	14.98	21.05	31.46	9.65
		L_{α_1}	0.0889	13.945	9.58	11.59	15.28	18.13	25.50	38.26	11.66

表10-15 元素谱线-2θ表[LiF(200),2d=4.0267][1]

原子序	元素	n	$K_{\alpha_{1,2}}$	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
19	K	1	136.68	136.59	136.85	118.12	—	—	—	—						
20	Ca	1	113.08	113.02	113.20	100.22	—	—					—	—	—	—
21	Sc	1	97.71	97.66	97.81	87.36	—	—				—	—	—	—	—
22	Ti	1	86.13	86.09	86.23	77.20	—					—	—	—	—	—
23	V	1	76.93	76.88	77.02	69.12					—	—	—	—	—	—
24	Cr	1	69.35	69.31	69.44	62.36					—	—	—	—	—	—
25	Mn	1	62.97	62.93	63.06	56.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	—	—	—	143.15					—	—	—	—	—	—
26	Fe	1	57.52	57.47	57.60	51.73		—	—	—	—					
		2	148.40	148.13	148.95	121.49						—	—	—	—	—
27	Co	1	52.78	52.75	52.86	47.47	—	—	—	—	—					
		2	125.56	125.54	125.86	107.22	—	—	—	—						
28	Ni	1	48.66	48.62	48.75	42.74	—	—	—	—				—	—	—
		2	110.99	110.86	111.25	96.53			—	—	—	—	—	—	—	—
29	Cu	1	45.03	44.99	45.12	40.45		—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	99.95	99.84	100.19	87.49	—					—	—	—	—	—
30	Zn	1	41.80	41.76	41.88	37.53	—	—	—	—	—					
		2	91.03	90.93	91.24	80.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31	Ga	1	38.92	38.88	38.99	34.91	—	—	—	—	—	—	—			
		2	83.55	83.45	83.75	73.73								—	—	—
32	Ge	1	36.33	36.29	36.41	32.56	—	—					—	—	—	—
		2	77.14	77.05	77.34	68.21	—					—	—	—	—	—
33	As	1	34.00	33.96	34.07	30.44	—	—	—	—	—					
		2	71.56	71.47	71.75	63.35					—	—	—			
34	Se	1	31.89	31.85	31.97	28.53					—	—		—	—	—
		2	66.66	66.55	66.83	59.05		—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	Br	1	29.97	29.93	30.05	26.79		—	—	—	—					—
		2	62.27	62.18	62.45	55.20	—	—	—	—						—
36	Kr	1	28.21	28.17	28.29	25.20	—	—						—	—	—
		2	58.35	58.28	58.52	51.74	—	—		—	—	—				
37	Rb	1	26.62	26.58	26.70	23.75	—	—					—	—	—	
		2	54.82	54.73	55.00	48.61	—					—	—	—		
38	Sr	1	25.15	25.11	25.25	22.42					—	—	—	—	—	—
		2	51.62	51.53	51.80	45.77	—	—	—	—	—	—				
39	Y	1	23.80	23.76	23.88	21.25				—	—	—				
		2	48.70	48.62	48.88	43.17			—	—	—					—

续表

原子序	元素	n	$K_{\alpha_{1,2}}$	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
40	Zr	1	22.55	22.51	22.69	20.07	·								—	—
		2	46.54	45.94	46.21	40.79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
41	Nb	1	21.40	21.36	21.45	19.03				·		—	·	—		
		2	43.59	40.51	43.79	38.62	·	·	—	—		—		—		
42	Mo	1	20.33	20.29	20.41	18.07		—		—					—	—
		2	41.34	41.25	41.51	36.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
43	Tc	1	19.28	19.25	19.34	17.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	39.14	39.09	39.26	34.81	—	—	—	—	—	—	—	·	·	

续表

原子序	元素	n	$K_{\alpha_{1,2}}$	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
58	Ce	1	10.22	10.17	10.37	9.00	79.30	79.73	71.61	66.53	70.03	71.37	69.03	61.35	91.79	81.18
		2	20.52	20.73	20.70	18.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
59	Pr	1	9.85	9.80	9.91	8.57	75.41	75.77	68.21	61.57	65.81	68.10	65.91	59.23	82.47	77.30
		2	19.77	19.68	19.05	17.38	—	—	—	—				151.75		
60	Nd	1	9.55	9.45	9.09	8.35	72.11	72.49	65.10	60.73	63.55	65.10	62.50	55.53	83.20	73.19
		2	19.25	18.97	19.45	16.75	—	—	—	—	—	—	—	137.66	—	—
61	Pm	1	9.18	9.14	9.25	8.55	69.07		62.24							—
		2	18.41	18.34	18.57	16.11	—					—			—	—
62	Sm	1	8.85	8.80	8.95	7.76	66.27	67.58	59.48	55.73	58.59	59.58	57.60	50.71	73.21	66.86
		2	17.72	17.65	17.82	15.56	—	—	153.87	138.56	154.05	157.61	150.36	117.05	—	—
63	Eu	1	8.55	8.50	8.67	7.51	63.50	63.93	56.96	53.48	55.87	57.10	55.45	48.62	72.19	
		2	17.14	17.05	17.33	15.05		—	145.90	128.39	130.51	136.32	137.16	115.84		
64	Gd	1	8.28	8.21	8.35	7.25	61.09	61.43	54.58	51.38	53.56	54.80	53.38	45.57	70.07	61.10
		2	16.56	16.47	16.75	14.52	—	—	133.00	120.21	126.65	133.96	127.62	101.49		
65	Tb	1	—	7.94	8.07	7.01	58.75	59.11	52.35	49.29	51.46	52.62	51.24	44.65	67.56	
		2	16.01	15.87	16.19	14.04	157.79	161.20	128.83	113.26	120.77	124.89	115.72	98.88		
66	Dy	1			—	—	55.59	56.95	50.20	47.50	49.35	50.56	49.35	42.90	64.82	56.22
		2	15.48	15.39	15.56	13.55	142.95	134.95	116.28	107.10	115.72	117.30	113.22	91.00		140.51
67	Ho	1	—	—	—	—	54.53	54.89	48.28	45.79	47.42	49.75	47.61	41.21	62.41	54.02
		2	14.96	14.89	15.06	—	132.77	134.37	109.75	122.30	107.29	112.91	107.15	89.42		130.10
68	Er	1				—	52.61	52.97	46.43	44.17	45.63	46.84	45.79	39.57	60.10	51.72
		2	14.50	14.41	14.66	12.70	124.86	126.27	104.07	97.32	101.71	105.35	102.19	85.22	—	151.48
69	Tm	1	—	—	—		52.77	51.13	44.66	42.61	43.91	45.19	44.19	38.15	58.09	49.51
		2	14.05	13.94	14.22	12.28	118.05	119.30	98.31	95.72	96.76	102.16	97.57	81.58	152.55	114.75
70	Yb	1	—	—	—	—	49.05	49.37	43.59	41.16	42.22	43.46	42.72	35.70	55.12	47.53
		2	13.60	13.51	13.78	11.92	112.24	113.29	94.26	89.33	90.32	95.56	92.46	78.04	136.35	106.65
71	Lu	1	—			—	47.43	47.76	41.19	39.78	40.74	41.97	41.26	35.34	54.26	44.34
		2	13.17	13.08	13.35	11.52	107.09	108.13	89.59	85.74	86.29	91.35	88.20	71.73	131.56	94.43
72	Hf	1	—	—	—	—	45.88	46.22	39.59	38.46	39.27	40.45	39.85	34.05	52.51	41.45
		2	12.75	12.67	12.92	11.15	102.44	103.43	86.07	82.41	84.34	87.55	85.07	71.55	127.40	98.22
73	Ta	1	—				44.41	44.74	38.46	37.20	37.87	39.04	32.55	32.83	51.05	42.85
		2	12.36	12.29	12.50	10.83	98.21	99.16	82.46	79.58	80.54	83.89	82.75	68.83	118.28	94.53
74	W	1			—	—	43.02	43.36	37.13	36.01	36.55	37.72	37.37	31.66	48.36	41.33
		2	12.01	11.94	12.19	10.51	94.32	95.25	79.09	76.37	77.55	80.53	75.65	65.13	112.93	89.90
75	Re	1			—	—	41.60	42.03	35.83	34.87	35.56	38.44	36.20	30.57	47.77	39.10
		2	11.68	11.57	11.84	10.10	90.54	91.64	75.55	73.54	74.01	77.46	78.05	61.60	108.10	84.12

原子序	元素	n	$K_{\alpha_{1,2}}$	K_{α_2}	K_{α_1}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
76	Os	1				—	40.42	40.75	34.65	33.78	34.07	35.32	35.08	29.49	46.56	39.51
		2	11.31	11.22	11.19	9.99	87.41	89.29	72.98	71.64	71.75	74.43	74.13	61.21	103.35	82.52
77	Ir	1					39.22	39.55	33.43	32.75	32.97	34.07	34.02	28.48	44.49	37.25
		2	10.98	10.88	11.17	9.59	84.32	85.14	70.31	68.65	68.93	71.73	71.52	58.57	99.38	79.43
78	Pt	1	—		—	—	38.06	38.40	32.25	31.75	31.82	32.96	32.89	27.53	43.72	35.45
		2	10.67	10.57	10.55	9.35	81.41	82.26	67.66	66.87	66.56	69.12	69.22	56.52	96.27	76.23
79	Au	1		—	—		36.95	37.30	31.22	30.83	30.73	31.99	32.00	26.60	42.51	34.75
		2	10.36	10.27	10.55	9.08	78.65	79.53	65.12	64.22	64.08	66.68	66.36	54.60	92.92	73.45
80	Hg	1					35.92	36.25	30.19	30.03	29.75	30.68	31.11	25.73	41.35	33.60
		2					76.12	76.94	62.98	62.18	61.53	64.35	64.56	52.58	89.83	70.64
81	Tl	1		—			34.92	35.24	29.21	29.06	28.78	29.51	30.22	24.88	40.23	32.53
		2	9.74	9.69	9.97	8.60	73.69	74.51	60.55	60.24	59.40	62.15	52.84	51.15	86.91	68.13
82	Pb	1				—	33.93	34.27	28.24	28.26	27.84	28.38	29.18	24.07	39.17	31.48
		2	9.53	9.43	9.70	9.31	71.41	72.21	58.40	58.45	57.54	60.35	60.94	49.30	84.03	65.72
83	Bi	1		—	—		33.01	33.35	27.35	27.44	26.95	28.38	28.30	23.30	38.17	30.43
		2	9.25	9.16	9.44	8.09	69.21	70.03	56.44	56.64	55.57	58.25	59.12	47.64	81.64	63.51
84	Po	1					32.11	32.46	26.48	26.69	26.10	27.22	27.49	22.56	—	—
		2		—			67.13	67.98	54.52	54.98	53.69	56.14	57.42	46.07		
85	At	1	—	—			31.25		25.65							
86	Rn	1	—	—			30.44		24.84			—	—			
87	Fr	1	—	—		—	29.64	—	24.07	24.60				20.50		—
		2	—	—		—	61.54	—	48.30	50.43	—			41.59	—	—
88	Ra	1	—	—			28.90	29.27	23.32	23.85		24.10	24.66	19.87	33.30	26.05
		2				—	—	—	47.68	49.03		49.56	51.26	40.16	70.85	53.57
89	Ac	1			—	—	28.17	—	22.60							
90	Th	1	—		—	—	27.47	27.81	21.91	22.73	21.61	22.70	22.78	18.57	32.15	24.56
		2					56.70	57.46	44.67	46.42	44.03	46.38	46.57	37.86	67.25	50.32
91	Pa	1					26.79	27.13	21.24	22.15	20.94	22.24	23.15	18.11	31.43	23.98
		2	—				55.20	55.96	43.28	45.20	42.65	44.96	47.51	36.70	65.62	49.01
92	U	1	—		—	—	26.11	26.49	20.60	21.60	20.33	21.40	22.56	17.56	30.71	23.07
		2	—				53.78	54.57	41.91	44.03	41.31	43.60	46.10	35.56	64.01	47.15
93	Np	1		—	—		25.50		19.96	21.05	—			17.28	—	—
		2				—	52.30		40.58	42.86			—	34.51		

表10-16 元素谱线-2θ表 [磷酸二氢铵 (ADP) (101)), 2d=10.642 Å

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{α_2}	K_β	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{γ_1}	L_{γ_3}	L_l	L_η
12	Mg	1		136.63		127.84		—		—		—		—		—
13	Al	1	103.16	103.14	105.18	97.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	Si	1	84.08	84.06	84.10	78.79				—	—	—	—	—	—	—
15	P	1		70.67		66.10									—	—
16	S	1	60.65	60.63	60.67	56.43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	Cl	1	52.75	52.74	52.76	48.88	—	—		—	—		—	—	—	—
		2	125.41	125.37	125.50	111.68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	Ar	1	46.40	46.39	46.43											
		2	103.96	103.95	104.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19	K	1	41.18	41.16	41.20	37.98									—	—
		2	89.38	89.35	89.46	80.34									—	—
20	Ca	1	36.80	36.79	36.83	33.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	78.30	78.27	78.36	70.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	Sc	1	33.11	33.10	33.14	30.26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	69.48	69.45	69.54	62.58										
22	Ti	1	29.96	29.95	29.97	27.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	62.23	62.20	62.29	56.38									—	—
23	V	1	27.23	27.21	27.25	24.79									—	—
		2	56.16	56.13	56.23	50.65										
24	Cr	1	24.85	24.83	24.89	22.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	51.03	50.97	51.07	46.13							—	—	—	—
25	Mn	1	22.80	22.78	22.83	20.68										—
		2	46.59	46.53	46.62	42.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	Fe	1	20.98	20.96	21.01	19.09		—					—		—	—
		2	42.72	42.67	42.76	38.55		—	—	—	—	—	—	—	—	—
27	Co	1	19.37	19.35	19.40	17.52										—
		2	40.32	40.29	40.38	36.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	Ni	1	17.84	17.82	17.87	16.21							—		—	—
		2	36.34	36.31	36.39	32.75							—		—	—
29	Cu	1	16.66	16.65	16.69	15.03	—	—		—		—		—	—	
		2	33.68	33.65	33.74	30.33		—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	Zn	1	15.51	15.50	15.54	13.98		—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	31.32	31.29	31.38	28.18										—
31	Ga	1	14.48	14.47	14.51	13.03	—	—	—	—	—	—		—	—	—
		2	29.20	29.17	29.26	26.24							—		—	—
32	Ge	1	13.55	13.53	13.58	12.18	158.55		145.65				—		—	—
		2	27.79	27.76	27.86	24.90		—								
33	As	1	12.70	12.69	12.73	11.40	130.68	—	124.41	—	114.0	—	—	—	—	—
		2	25.56	25.51	25.63	22.92							—		—	—

原子序	元素	n	K_{α}	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_3}	L_{β_2}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_{η}
34	Se	1	11.03	11.02	11.06	10.70	115.39	—	110.34	—	—	—	—	—	150.96	138.72
		2	23.98	23.95	24.05	21.49				—	—	—	—	—	—	—
35	Br	1	11.22	11.21	11.26	10.06	105.81	—	99.66	—	—	—	—	—	128.45	120.81
		2	22.57	22.54	22.62	20.19								—	—	—
36	Kr	1	10.58	10.57	10.61	9.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	21.26	21.23	21.32	19.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
37	Rb	1	9.99	9.98	10.02	9.03	86.69	86.99	83.35	—	79.25	79.72	82.03	—	103.60	98.15
		2	20.06	20.03	20.12	17.92								—	—	—
38	Sr	1	9.45	9.43	9.45	8.44	80.31	80.41	76.05		75.52	73.97	75.55	—	94.63	89.33
		2	18.96	18.93	19.03	16.92	—	—	—	—					—	—
39	Y	1	8.96	8.95	8.99	7.95	74.69	74.89	71.42	—	66.42	68.88	69.67	—	87.45	82.84
		2	17.95	17.92	18.01	15.00	—	—	—	—	—	—	—	—		
40	Zr	1	8.49	8.47	8.52	7.56	69.56	69.66	66.51	63.32	63.92	64.36	64.90	—	81.10	76.75
		2	17.02	16.99	17.05	15.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
41	Nb	1	8.06	8.04	8.09	7.17	65.05	65.18	62.14	58.97	59.66	60.30	60.50	55.49	75.53	71.41
		2	16.15	16.12	16.21	14.37	—	—	—	158.69	—		—	142.02		
42	Mo	1	7.66	7.64	7.69	6.81	61.06	61.16	58.21	55.11	56.21	55.64	56.64	52.53	70.07	66.96
		2	15.35	15.32	15.41	13.55	—	—	153.26	135.40	140.53	143.17	—	125.27		
43	Tc	1	7.27	7.26	7.29	6.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	14.56	14.54	14.62	13.00	—	—	—	—						
44	Ru	1	6.94	6.93	6.98	6.17	54.17	54.27	51.46	46.51	49.57	50.10	49.37	46.28	62.28	58.56
		2	13.91	13.88	13.96	12.35	131.19	131.60	120.58	120.48	114.95	116.12	114.95	108.57		
45	Rh	1					51.19	51.28	48.54	45.68	47.10	47.53	46.98	43.56	58.71	55.00
		2	13.27	13.24	13.33	11.77	119.53	119.68	110.57	101.84	106.29	107.41	105.71	95.85	157.28	136.51
46	Pd	1					48.46	48.56	45.88	43.10	44.56	44.96	44.34	40.97	55.47	51.94
		2	12.66	12.63	12.73	11.23	110.33	110.64	102.57	94.54	98.61	99.63	98.07	88.55	137.05	122.28
47	Ag	1	—	—	—		45.95	45.05	43.40	40.73	42.22	42.65	41.93	36.66	52.51	49.05
		2	12.10	12.07	12.16	10.72	102.95	102.95	95.58	88.20	92.17	93.39	91.39	82.51	124.42	112.26
48	Cd	1					43.65	43.75	41.13	38.58	40.05	40.48	39.71	36.55	49.75	46.41
		2	11.59	11.51	11.64	10.24	96.06	96.31	89.20	82.86	86.47	87.57	85.58	77.64	114.69	104.60
49	In	1	—	—	—	—	41.52	41.62	39.03	35.55	38.06	38.48	37.07	34.57	47.89	43.95
		2	11.18	11.15	11.24	9.80	90.21	90.39	83.85	77.72	81.47	82.46	80.44	72.92	106.06	96.99
50	Sn	1					39.54	39.64	37.09	34.72	36.19	36.62	35.78	32.76	44.99	41.71
		2	10.61	10.59	10.68	9.38	85.17	85.41	78.01	73.22	76.82	77.86	75.63	68.67	99.84	90.02
51	Sb	1	—	—	—	—	37.71	37.81	35.29	32.31	34.46	34.89	34.04	31.08	42.86	38.63
		2	10.17	10.14	10.24	8.99	80.53	80.79	74.61	69.25	72.65	73.67	71.67	64.81	93.89	85.37
52	Te	1	—	—	—	—	35.01	35.11	33.61	31.45	32.85	33.27	32.42	29.53	40.83	37.75
		2					76.36	76.61	71.63	65.59	68.87	69.85	67.88	61.29	88.62	80.51
53	I	1	—	—		—	34.45	34.79	—	—	—	—	—	—	36.05	35.06

续表

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{β_2}	K_{γ_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
		2	–	–	–	–	72.50	72.81	–	–	–	–	–	–	83.02	76.11
54	Xe															
55	Cs	1	–	–	–	–	31.54	31.65	29.21	27.80	29.60	29.02	28.20	25.49	35.75	32.67
		2	–	–	–	–	65.85	66.09	60.57	56.83	59.20	60.15	58.12	52.36	75.75	68.45
56	Ba	1			–		30.23	30.34	27.93	26.11	27.35	27.78	26.98	24.32	34.27	31.20
		2	–	–	–	–	62.87	63.12	57.70	53.72	55.44	57.50	55.62	49.82	72.20	65.38
57	La	1	–	–	–	–	29.01	29.11	26.31	24.99	26.18	26.61	25.83	23.22	32.92	29.63
		2	–	–	–	–	60.11	60.34	55.03	51.28	53.87	54.80	53.18	47.46	68.80	61.58
58	Ce	1					27.85	27.95	25.58	23.96	25.08	25.53	24.76	22.30	31.52	28.30
		2			–		57.54	57.77	52.66	49.08	51.47	52.39	50.78	45.28	65.92	58.59
59	Pr	1			–		26.70	26.87	24.51	22.97	24.05	24.46	23.75	21.23	30.33	27.31
		2	–	–	–	–	55.14	55.38	50.23	46.94	49.24	50.14	48.62	43.25	63.32	56.34
60	Nd	1	–				25.74	25.85	23.49	22.05	23.05	23.49	22.80	20.32	29.12	26.17
		2	–	–	–	–	52.90	53.15	48.05	44.99	47.11	48.05	46.57	41.43	60.38	53.94
61	Pm	1					24.77		22.56		–	–	–	–	–	–
		2	–	–	–	–	50.61	–	46.05	–	–	–	–	–	–	–
62	Sm	1	–	–	–	–	23.86	23.97	21.61	20.37	21.25	21.67	21.07	18.57	26.97	24.06
		2	–	–	–	–	48.63	49.08	44.19	41.42	43.27	44.17	42.87	37.87	55.51	49.28
63	Eu	1	–				22.99	23.13	20.79	19.61	20.43	20.85	20.25	17.92	26.01	
		2	–	–	–	–	46.97	47.23	42.31	39.82	41.55	42.44	41.25	36.30	53.50	–
64	Gd	1	–	–	–	–	22.17	22.49	19.98	18.86	19.65	20.06	19.88	17.20	25.09	22.21
		2	–	–	–	–	45.23	45.48	40.60	38.30	39.86	40.76	39.70	34.91	51.50	45.30
65	Tb	1	–	–			21.40	21.51	19.22	18.19	18.89	19.31	18.53	16.53	24.20	
		2	–	–	–	–	43.59	43.84	39.00	36.86	38.31	39.20	38.20	33.41	49.54	–
66	Dy	1	–	–	–	–	20.66	20.79	18.49	17.55	18.18	18.60	18.18	15.91	23.40	20.54
		2	–	–	–	–	42.04	42.30	37.40	35.52	36.83	37.72	36.65	32.13	47.86	41.76
67	Ho	1	–	–	–	–	19.96	20.09	17.80	16.95	17.50	17.93	17.53	15.36	22.61	19.76
		2	–	–	–	–	40.57	40.83	36.05	34.25	35.43	36.53	35.50	30.89	46.17	40.13
68	Er	1	–	–	–	–	19.30	19.43	17.16	16.36	15.87	17.30	16.93	14.73	21.87	19.10
		2	–	–	–	–	39.18	39.44	34.71	33.06	34.18	35.02	34.25	29.70	44.60	38.85
69	Tm	1	–	–	–	–	18.67	18.79	16.53	15.81	16.25	16.69	16.36	14.20	21.17	18.34
		2	–	–	–	–	37.80	38.12	33.42	31.93	32.87	33.74	33.07	28.62	43.11	37.17
70	Yb	1	–	–	–	–	18.08	18.20	15.94	15.29	15.69	16.11	15.84	13.68	20.50	17.68
		2					36.63	36.87	32.20	30.82	31.68	32.55	31.99	27.56	41.70	35.90
71	Lu	1	–		–	–	17.51	17.62	15.37	14.79	15.13	15.56	15.32	13.19	19.87	15.96
		2	–		–	–	35.44	35.68	31.03	29.84	30.54	31.41	30.93	26.56	40.37	32.24
72	Hf	1	–	–	–	–	16.96	17.58	14.84	14.32	14.61	15.03	14.84	12.72	19.37	15.46
		2					34.31	34.56	29.91	28.87	29.46	30.33	29.93	25.60	39.12	33.37
73	Ta	1	–		–	–	16.44	16.56	14.33	13.90	14.11	14.53	14.37	12.28	18.69	15.89

续表

原子序	元素	n	K_{α}	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_5}	L_{γ_1}	L_l	L_{η}
		2					33.24	33.49	28.88	27.94	28.43	29.30	28.57	24.70	37.91	32.16
74	W	1	—	—	—	—	15.85	16.07	13.84	13.43	13.63	14.06	13.52	11.65	18.15	15.35
		2				—	32.22	32.47	27.85	27.05	27.46	28.22	28.06	23.60	36.77	30.98
75	Re	1	—				15.48	15.60	13.37	13.02	13.17	13.59	13.59	11.49	17.63	14.83
		2	—			—	31.24	31.49	26.92	26.21	26.52	27.38	27.30	23.00	35.09	29.92
76	Os	1	—	—	—	—	15.02	15.14	12.92	12.62	12.73	13.15	13.09	11.05	17.13	14.33
		2	—	—	—	—	30.31	30.56	26.01	25.42	25.61	26.47	26.36	22.21	34.65	28.95
77	Ir	1	—	—	—	—	14.59	14.71	12.49	12.25	12.31	12.74	12.71	10.69	16.65	13.87
		2	—	—	—	—	29.42	29.67	25.14	24.64	24.76	25.62	25.58	21.47	33.67	27.94
78	Pt	1	—	—	—	—	14.17	14.32	12.08	11.89	11.91	12.32	12.33	10.38	16.20	13.41
		2	—	—	—	—	28.57	28.83	24.30	23.89	23.95	24.79	24.82	20.74	32.73	27.01
79	Au	1	—	—	—	—	13.78	13.90	11.59	11.54	11.53	11.94	11.98	9.99	15.77	12.94
		2	—	—	—	—	27.76	28.01	23.30	23.21	23.15	24.00	24.10	20.05	31.81	26.13
80	Hg	1	—	—	—	—	13.39	13.52	11.31	11.21	11.15	11.56	11.65	9.60	15.35	12.56
		2	—	—			26.98	27.23	22.75	22.53	22.40	23.25	23.41	19.40	30.99	25.27
81	Tl	1					13.03	13.15	10.96	10.90	10.79	11.21	11.32	9.35	14.95	12.17
		2		—	—	—	26.23	26.45	22.00	21.89	21.68	22.52	22.75	18.77	30.17	24.47
82	Pb	1		—	—	—	12.68	12.80	10.59	10.65	10.45	10.86	11.01	9.05	14.57	11.76
		2	—	—	—	—	25.52	25.77	21.27	21.25	20.99	21.83	22.12	18.36	29.39	23.75
83	Bi	1					12.34	12.46	10.26	10.17	10.30	10.53	10.71	8.76	14.21	11.47
		2					24.83	25.06	20.67	20.39	20.69	21.15	21.52	17.50	28.84	22.95
84	Po	1					12.01	12.14	9.94	10.22	9.87	10.22	10.41	8.49		
		2				—	24.16	24.42	19.96	20.12	19.68	20.51	20.94	17.02	—	—
85	At	1	—	—												
		2	—	—	—	—	—								—	—
86	Rn	1	—													
		2				—	—	—	—	—	—	—		—	—	—
87	Fr	1		—	—	—	11.11		9.55	9.25				7.92	—	—
		2		—	—	—	22.32		18.16	18.55				15.46	—	—
88	Ra	1	—	—			10.93	10.96	8.77	9.00	8.67	9.08	9.39	7.48	12.58	9.76
89		2					21.77	25.02	17.59	16.30	17.35	18.13	18.84	15.00	25.34	19.54
90	Th	1		—	—	—	10.21	10.45	8.25	8.33	9.13	9.54	9.02	7.04	12.02	9.21
		2		—	—	—	20.56	20.56	16.54	17.15	15.31	17.19	17.40	14.19	24.15	18.48
91	Pa	1	—	—	—		10.08	10.18	8.00	8.54	7.85	9.30	9.71	6.83	11.77	8.94
		2	—				20.19	20.45	16.04	16.72	15.82	16.64	17.40	13.68	23.56	17.94
92	U	1	—				9.82	9.94	7.76	8.16	7.65	8.06	8.50	6.62	11.61	8.98
		2					19.71	19.97	15.55	16.31	15.34	15.16	17.04	13.27	23.14	17.41
93	Np	1	—	—	—	—	9.58		7.52	7.83				6.43		
		2	—	—			19.23		15.07	15.89		—	—	12.86		

表10.17 元素谱线-2θ表 [黄玉(303), 2d=2.712]

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{γ_1}	L_{γ_2}	L_l	L_η
22	Ti	1	—	—	—	135.92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
23	V	1	134.81	134.77	135.19	114.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
24	Cr	1	115.29	115.18	115.49	100.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
25	Mn	1	101.60	101.61	101.87	89.55	—	—		—	—	—	—	—	—	—
26	Fe	1	91.18	91.16	91.34	80.74			—							
27	Co	1	82.67	82.54	82.76	73.40			—			—				
28	Ni	1	75.44	75.37	75.57	67.36	—	—	—	—		—		—		
29	Cu	1	69.29	69.23	69.42	61.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	Zn	1	63.56	63.50	64.09	57.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		2	—			145.56										—
31	Ga	1	59.28	59.22	59.41	53.89										—
		2	163.13	162.42	164.70	125.93										
32	Ge	1	55.15	55.08	55.27	49.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	135.57	135.27	136.16	112.72	—	—		—	—		—	—	—	—
33	As	1	51.45	51.39	51.57	45.89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	120.48	120.25	120.93	102.46	—	—		—	—		—	—	—	—
34	Se	1	48.14	48.08	48.26	42.92	—		—	—		—		—	—	
		2	109.31	109.11	109.70	94.05			—	—		—		—	—	
35	Br	1	45.15	45.09	45.27	40.23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		2	100.33	100.12	100.66	86.92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36	Kr	1	42.43	42.37	42.55	37.80										
		2	92.73	92.57	93.06	80.76	—	—	—	—	—		—	—	—	—
37	Rb	1	39.97	39.91	40.09	35.58						—		—	—	
		2	86.21	86.08	86.56	76.34			—			—		—	—	
38	Sr	1	37.72	37.65	37.84	33.56	—		—	—	—	—	—	—	—	—
		2	80.55	80.40	80.96	70.53	—		—	—	—	—	—	—	—	—
39	Y	1	35.65	35.59	35.78	31.70										
		2	75.60	75.36	75.80	66.22	—	—		—				—		—
40	Zr	1	33.75	33.69	33.88	29.89			—		—	—	—	—	—	—
		2	70.99	70.84	71.28	62.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
41	Nb	1	32.00	31.94	32.13	28.42	—	—								
		2	66.91	66.77	67.20	58.51	—					—		—		
42	Mo	1	30.38	30.32	30.51	26.98						—		—	—	—
		2	63.22	63.07	63.50	55.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

续表

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{α_2}	K_β	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
43	Tc	1	28.82	28.75	28.88	25.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	59.65	59.55	59.84	52.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
44	Ru	1	27.49	27.43	27.62	24.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	56.76	56.62	57.03	49.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
45	Rh	1	26.30	26.24	26.33	23.21	—	—	—	—	—	—	—	—		
		2	53.91	53.78	54.19	47.45			—	—	—	—		—		
46	Pd	1	25.00	24.93	25.12	22.73			—		—	—			—	—
		2	51.29	51.15	51.57	45.15	—		—	—	—	—	—	—		
47	Ag	1	23.87	23.81	24.00	21.32										
		2	48.86	48.73	49.13	43.00	—	—	—		—	—				
48	Cd	1	22.82	22.75	22.94	20.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	46.61	46.47	46.88	41.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
49	In	1	21.83	21.77	21.96	19.50						—				
		2	44.51	44.39	44.78	39.37	—							—	—	—
50	Sn	1	20.91	20.84	21.03	18.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	42.55	42.42	42.82	37.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
51	Sb	1	20.04	19.97	20.17	17.69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	40.72	40.58	40.99	35.63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
52	Te	1	19.22	19.16	19.35	16.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	39.01	38.88	39.28	34.31										
53	I	1	18.45	18.36	18.58	16.26										
		2	37.40	37.27	37.67	32.89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
54	Xe	1	17.71	17.65	17.84	15.62										
		2	35.88	35.73	36.12	31.53										
55	Cs	1	17.04	16.97	17.17	15.02			163.36	135.66	151.44	156.97	145.90	119.92		
		2	34.47	34.39	34.74	30.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
56	Ba	1	16.39	16.33	16.52	14.44	—	—	142.41	124.86	136.16	140.80	132.50	111.46	—	—
		2	33.13	33.00	33.40	29.31										
57	La	1	15.78	15.71	15.91	13.89	158.95	160.87	130.03	116.22	123.42	129.09	122.59	104.30	—	—
		2	31.87	31.73	32.13	27.99	—	—	—	—	—	—	—	—		—
58	Ce	1	15.20	15.13	15.33	13.37	141.40	143.76	120.80	109.35	114.85	120.02	114.55	98.11	—	150.06
		2	30.67	30.54	30.94	26.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

续表

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{β_1}	K_{β_2}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
59	Pr	1	14.55	14.68	14.78	12.88	130.46	131.49	112.77	102.77	129.56	112.49	107.73	92.60	—	135.72
		2	29.54	29.40	29.60	25.93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
60	Nd	1	14.25	14.06	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

续表

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_α	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
		2	15.81	16.69	17.10	14.71	-		123.89	116.23	120.82	127.96	126.98	98.31	—	-
77	Ir	1	·				55.77	60.32	50.55	49.50	49.75	51.56	51.43	42.66	60.25	53.64
		2	15.34	16.20	16.61	14.28	—	—	117.57	113.71	114.37	120.89	122.67	93.90		
78	Pt	1		..	—	—	57.91	58.46	48.78	47.65	48.04	49.81	45.89	41.57	57.13	51.57
		2	15.85	15.73	16.14	15.89	151.06	155.20	121.35	105.71	108.99	114.77	111.99	89.59		102.81
79	Au	1			·	·	55.15	56.70	47.10	46.48	46.35	46.16	48.38	39.55	65.12	52.65
		2	15.41	15.27	15.65	13.47	142.52	143.49	106.09	104.23	105.90	109.37	112.02	86.30	—	124.99
80	Hg	1	—	—	—	·	54.47	55.01	45.49	45.58	44.50	46.57	46.92	38.60	63.23	50.63
		2	—	—	—	—	132.56	134.05	101.50	100.12	99.12	104.70	105.54	82.76		118.27
81	Tl	1	—	—	—	—	52.87	53.41	43.97	43.74	43.50	45.06	45.54	37.31	61.41	49.11
		2	14.55	14.42	14.83	12.71	125.84	128.00	96.95	96.23	95.16	100.65	101.44	79.55	—	112.53
82	Pb	1	—	·			51.35	51.89	42.47	42.50	41.37	40.81	44.23	36.07	50.70	47.51
		2	14.15	14.01	14.43	12.36	120.12	122.08	92.83	92.93	91.75	95.36	97.66	75.52	—	107.84
83	Bi	1	—	—	..	..	49.89	50.43	41.10	41.24	40.19	42.23	42.97	34.89	59.06	45.95
		2	13.78	13.62	14.04	12.02	115.03	116.85	89.18	89.56	87.60	92.15	94.20	73.69	152.13	102.54
84	Po	1					48.50	49.04	39.78	40.08	39.18	40.99	41.79	—	..	—
		2					110.44	112.37	85.70	86.52	84.22	88.65	91.00	—	—	—
85	At	1														
		2	—	—	—	—	—	—	—	—		..				
86	Rn	1	..	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
		2	..												—	
87	Fr	1		·	—	—	44.55	—	36.07	36.88	—	—	—	30.64	·	—
		2	—	—	—		98.87	—	76.52	78.48				63.73		
88	Ra	1	—	—	—		43.49	44.03	34.92	35.88	34.41	36.12	37.46	25.58	50.58	39.35
		2	—	—	—	—	95.52	97.12	73.75	76.05	72.50	76.68	79.91	61.63	118.75	84.50
89	Ac															
90	Th	1	—	..			41.28	41.81	32.78	34.03	32.32	33.59	35.55	27.87	48.56	36.75
		2	11.38	12.24	11.67	9.90	89.66	91.07	66.71	71.83	67.65	71.53	75.25	57.59	110.64	78.12
91	Pa	1	—	—	..		40.23	40.77	31.77	33.15	31.33	32.98	34.66	27.03	47.45	35.65
		2	—	—	—	~	86.93	88.31	66.82	69.56	65.36	69.19	73.13	55.73	107.10	75.43
92	U	1		..	—	—	39.24	39.77	30.75	32.31	30.38	32.02	33.60	26.20	45.39	34.64
		2	10.80	10.66	11.08	9.42	84.36	85.75	64.14	67.65	63.17	66.95	71.10	53.92	103.79	72.86
93	Np	1	—	—			38.25		29.82	31.46				25.44	...	
		2			—	—	81.90	—	61.95	65.21	—	—	—	52.20		—

表10-18 元素谱线-2θ表 [NaCl(200), 2d=5.641][4]

原子序	元素	n	$K_α$	$K_{α_1}$	$K_{α_2}$	$K_β$	$L_{α_1}$	$L_{α_2}$	$L_{β_1}$	$L_{β_2}$	$L_{β_3}$	$L_{β_4}$	$L_{γ_1}$	$L_{γ_3}$	L_l	$L_η$
16	S	1	144.53	144.47	144.55	126.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	Cl	1	113.91	113.88	113.98	102.62				—	—	—	—	—		—
18	Ar	1	96.02	95.99	96.08	—	—	—							—	—
19	K	1	83.12	83.09	83.19	75.51	—	—	—	—	—	—	—	—		
20	Ca	1	73.10	73.07	73.16	66.42	—	—	—	—	—					
21	Sc	1	65.03	65.01	65.06	59.04	—					—	—	—	—	—
		2				162.44							—	—	—	—
22	Ti	1	58.34	58.32	58.40	52.90							—	—	—	—
		2	154.86	154.64	154.71	126.08	—	—	—	—	—					
23	V	1	52.72	52.69	52.78	47.78				—		—	—	—	—	—
		2	125.26	125.15	125.46	105.17					—	—	—	—	—	—
24	Cr	1	47.92	47.89	47.98	43.09				—	—	—	—	—		—
		2	108.63	108.63	108.81	95.82	—		—	—	—	—	—			
25	Mn	1	43.76	43.75	43.84	39.53	—		—	—	—	—	—			
		2	96.47	96.35	96.59	87.25	—	—	—	—	—		—			
26	Fe	1	40.17	40.14	40.23	36.29	—	—	—	—	—	—	—		—	—
		2	86.76	86.59	86.91	77.05	—	—	—	—	—					
27	Co	1	37.01	36.98	37.06	33.30	—	—	—						—	—
		2	78.80	78.73	78.93	70.15	—	—	—	—					—	
28	Ni	1	34.21	34.18	34.25	30.84	—			—	—	—	—	—	—	—
		2	72.06	72.00	72.19	64.25	—	—		—					—	—
29	Cu	1	31.72	31.70	31.79	28.58							—	—	—	—
		2	66.27	66.21	66.40	59.15				—	—					
30	Zn	1	29.50	29.48	29.56	26.55	—	—	—	—	—	—	—	—		
		2	61.25	61.17	61.35	54.67	—	—	—	—	—	—	—	—		
31	Ga	1	27.51	27.48	27.57	24.77				—	—	—	—	—		
		2	56.79	56.73	56.91	50.91	—	—						—	—	—
32	Ge	1	25.72	25.69	25.77	23.09	—		—	—	—					
		2	52.86	52.96	52.95	47.19	—	—	—	—	—					
33	As	1	24.09	24.06	24.14	21.61					—	—	—	—		
		2	49.34	49.28	49.45	44.00					—	—	—	—	—	
34	Se	1	22.62	22.59	22.57	20.28				—	—	—	—	—	—	—
		2	46.18	46.12	46.30	41.18	—	—	—							
35	Br	1	21.27	21.24	21.31	19.03	—		—	—	—	—				
		2	43.32	43.26	43.44	38.62	—	—	—	—	—	—	—	—		
36	Kr	1	20.04	20.01	20.25	17.92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

续表

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{γ_1}	L_{γ_3}	L_l	L_η
		2	40.72	40.67	40.84	35.39			—	—	—	—	—	—	—	—
37	Rb	1	18.91	18.89	18.97	16.09			—	—	—	—	—	—	—	—
		2	38.37	38.31	38.49	34.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
38	Sr	1	17.88	17.85	17.94	15.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		2	36.27	36.16	35.38	33.93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
39	Y	1	16.93	16.90	16.98	15.09			—	—	—	—	—	—	—	—
		2	34.24	34.18	34.36	30.45	—	—	—	—						
40	Zr	1	16.05	16.02	16.10	14.29				164.95						
		2	32.46	32.35	32.54	28.81	—	—	—	—	—	—	—			
41	Nb	1	15.25	15.20	15.29	13.56	—	—	153.61	136.45	143.65	142.73	—	126.44	—	—
		2	30.74	30.68	30.86	27.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	Mo	1	14.48	14.45	14.53	12.87	146.58	147.39	136.19	131.55	125.42	127.61	—	113.80	—	—
		2	29.19	29.13	29.31	25.91										
43	Tc	1	13.73	13.71	13.77	12.28										
		2	27.67	27.62	27.75	24.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
44	Ru	1	13.12	13.09	13.18	11.65	118.40	118.72	109.55	101.60	105.38	106.04	106.58	95.70	154.64	154.65
		2	26.42	26.38	26.54	23.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
45	Rh	1	12.51	12.48	12.57	11.10	109.17	109.45	101.08	94.15	97.81	98.97	97.51	88.70	136.27	121.49
		2	25.18	25.12	25.30	22.31										
46	Pd	1	11.94	11.91	12.00	10.59	101.48	101.74	94.61	87.72	91.32	92.38	90.78	82.64	122.78	111.41
		2	24.02	23.96	24.14	21.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
47	Ag	1	11.41	11.38	11.47	10.11	94.85	95.11	88.45	82.06	85.61	86.63	84.91	77.28	113.13	103.11
		2	22.94	22.88	23.06	20.30	—	—	—	—						
48	Cd	1	10.91	10.88	10.97	9.66	89.07	89.31	83.01	77.05	80.52	81.49	79.70	72.50	105.16	98.05
		2	21.93	21.87	22.05	19.30										
49	In	1	10.45	10.42	10.51	9.24	83.93	84.17	78.10	72.57	75.92	76.88	75.05	68.19	98.55	90.84
		2	20.98	20.92	21.10	18.55									—	—
50	Sn	1	10.02	9.98	10.07	8.85	79.31	79.54	73.74	68.71	71.75	72.65	70.84	64.88	92.40	84.33
		2	20.09	20.03	20.22	17.75	—				—	—	—	—	—	—
51	Sb	1	9.60	9.57	9.66	8.48	75.13	75.37	69.76	64.82	67.65	68.32	67.04	60.73	87.1?	79.51
		2	19.26	19.20	19.38	17.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
52	Te	1	9.21	9.18	9.27	8.13	71.33	71.57	66.11	61.46	64.47	65.36	63.56	57.48	82.41	75.11
		2	18.47	18.47	18.60	16.31						—	—	148.16	—	—
53	I	1	8.84	8.81	8.90	7.80	67.85	68.08	62.76	58.36	61.28	62.15	60.38	54.49	78.19	71.15
		2	17.74	17.67	17.86	15.65			—	151.40				132.57		
54	Xe	1	8.49	8.44	8.50	7.49			—	—						

续表

原子序	元素	n	K_{α}	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{γ_1}	L_{γ}	L_l	L_{η}
		2	17.72	16.56	17.15	15.01			—	—	—	—	—	—	—	
55	Cs	1	8.17	8.14	8.25	7.20	61.69	61.81	56.81	52.87	55.54	56.42	54.75	49.15	70.77	64.08
		2	16.48	16.32	16.56	14.44		—	144.13	125.85	137.44	141.36	103.64	112.68	—	—
56	Ba	1	7.86	7.83	7.92	5.93	58.94	59.17	54.15	50.45	52.98	53.56	52.21	46.82	57.53	60.90
		2	15.76	15.69	15.86	13.88	159.42	161.78	131.59	116.95	126.26	129.37	125.31	105.21		
57	La	1	7.57	7.54	7.63	6.67	56.35	56.60	51.57	48.13	50.59	51.46	45.55	44.62	54.46	58.11
		2	15.17	15.10	15.29	13.35	141.79	142.94	121.13	109.45	117.41	120.50	114.95	98.82	—	152.47
58	Ce	1	7.29	7.25	7.35	6.43	54.30	54.21	49.37	46.12	48.58	49.22	47.71	42.58	52.67	55.97
		2	14.61	14.55	14.73	12.86	130.19	131.37	113.28	103.08	110.61	112.78	107.38	93.15	.	136.73
59	Pr	1	7.03	6.99	7.09	6.18	51.77	51.98	47.30	44.13	46.78	47.12	45.70	40.68	55.14	52.89
		2	14.08	14.02	14.20	12.38	121.65	122.46	106.40	97.41	103.63	106.24	101.95	88.09	161.42	115.51
60	Nd	1	6.84	6.74	6.91	5.96	49.50	49.92	45.17	42.30	44.79	45.17	43.79	38.89	58.63	50.56
		2	13.72	13.51	13.65	11.94	111.31	115.12	100.33	92.30	97.37	100.38	96.45	83.47	141.17	113.33
61	Pm	1	—	—	—	—	47.74		43.30	—	—	-				.
		2	13.12	13.06	13.23	11.48	108.05		95.10	—	—	-			.	-
62	Sm	1		—	—	-	45.90	46.13	41.48	38.98	45.71	41.54	40.38	36.65	62.51	46.22
		2	12.64	12.58	12.77	11.11	102.49	103.18	90.19	83.71	88.15	95.35	87.35	75.49	123.28	105.73
63	Eu	1	—	—	-		44.16	45.40	39.60	37.47	38.06	39.93	38.01	34.19	50.35	—
		2	12.22	12.15	12.34	10.72	97.50	99.18	85.81	79.94	83.96	86.15	83.29	71.93	116.25	—
64	Gd	1		—	—	—	42.53	42.77	38.21	36.05	37.35	38.35	37.36	32.78	48.39	42.61
		2	11.80	11.74	11.63	10.35	93.01	93.64	81.77	76.16	80.06	82.14	79.67	68.72	110.10	95.20
65	Tb	1		—	—	..	41.09	41.23	36.71	34.70	36.06	36.85	35.95	31.47	46.60	—
		2	11.41	11.34	11.55	10.01	88.93	81.64	78.07	73.24	76.45	78.52	76.23	65.69	105.72	—
66	Dy	1	—	—	.		39.56	39.79	35.29	35.44	34.66	35.51	34.68	30.27	44.99	39.87
		2	11.05	10.97	11.16	9.66	85.18	85.79	74.64	70.36	73.17	75.16	73.17	62.95	99.86	84.55
67	Ho	1	—	—	—	—	38.18	38.42	33.55	32.25	33.36	34.23	33.42	29.10	43.41	37.77
		2	10.68	10.57	10.80	...	81.69	82.29	71.45	67.49	70.07	72.0	70.21	60.32	95.41	80.68
68	Er	1	—				36.88	37.13	33.09	31.14	32.14	32.97	32.25	27.98	41.95	36.25
		2	10.34	10.27	10.46	9.05	78.49	79.08	68.50	64.52	67.25	69.16	67.49	57.83	91.47	77.05
69	Tm	1		--	—	—	35.65	35.88	31.47	30.57	30.95	31.79	31.15	26.97	40.58	34.99
		2	10.01	9.94	10.13	8.76	75.48	76.05	65.70	62.73	64.51	66.40	64.96	55.60	87.76	72.91
70	Yb	1		—	—	--	34.48	34.71	30.73	29.09	29.81	30.66	30.13	25.97	39.24	33.71
		2	9.69	9.63	9.82	8.49	72.71	73.25	63.09	60.21	61.96	63.84	62.51	53.41	84.37	70.68
71	Lu	1	—	—	—		33.37	33.50	29.23	28.11	28.77	29.59	29.13	25.01	37.99	30.37
		2	9.39	9.33	9.52	8.22	70.38	70.62	60.62	58.12	59.55	61.42	60.39	51.38	81.23	65.16
72	Hf	1	—	—			32.31	32.54	28.20	27.25	27.75	28.57	28.20	24.13	35.81	31.33

原子序	元素	n	K_α	K_{β_1}	K_{β_2}	K_{β_3}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
		2	9.10	9.04	9.23	7.65	67.65	68.16	58.31	56.10	57.33	59.15	58.31	49.42	78.33	55.37
73	Ta	1			—	—	31.30	31.52	27.21	26.32	26.79	27.50	37.23	23.23	35.58	30.23
		2			—	—	65.21	65.84	56.18	54.13	55.20	56.99	58.31	47.59	75.58	52.87
74	W	1		—	—	—	30.34	30.56	26.27	25.43	25.57	26.68	28.44	22.48	34.61	29.18
		2		—	—	—	63.13	53.65	54.06	52.37	53.20	54.97	54.43	45.84	73.02	50.51
75	Re	1	—	—	—		28.43	25.66	25.37	24.70	24.39	25.80	35.53	21.63	33.50	28.18
		2	—	—	—		51.26	51.58	53.10	50.65	51.27	53.02	52.63	44.19	70.83	58.38
76	Os	1	—	—			28.55	28.73	24.51	23.94	24.14	24.95	24.84	20.52	32.64	27.25
		2		—	—	—	59.11	59.63	50.23	49.01	45.44	51.15	50.96	42.62	68.38	56.17
77	Ir	1	—				27.72	37.95	23.69	23.22	23.14	24.14	24.11	20.23	31.71	30.82
		2					57.27	57.77	48.47	47.47	47.72	45.44	49.07	41.14	66.23	54.16
78	Pt	1	—				26.92	27.13	22.90	22.53	22.77	23.36	23.39	19.57	30.83	25.45
		2	—	—		—	55.49	56.01	46.79	46.00	46.68	47.75	47.81	39.71	64.23	52.25
79	Au	1	—	—	—	—	26.16	26.30	22.15	21.87	21.82	22.62	22.72	18.91	29.93	24.52
		2			—	—	53.81	54.33	45.18	44.60	44.42	46.27	45.39	38.35	62.85	50.48
80	Hg	1	—				25.42	25.66	21.43	21.24	21.17	21.91	22.07	18.29	29.19	25.82
		2	—		—	—	52.21	52.73	43.55	43.26	43.49	44.68	45.01	37.06	60.52	48.75
81	Tl	1	—	—	—	—	24.72	24.96	20.74	20.61	20.41	21.20	21.45	17.69	28.42	23.96
		2					50.69	51.20	42.19	41.58	41.56	43.24	43.69	35.83	58.81	47.15
82	Pb	1	—				24.05	24.28	20.06	20.07	19.78	20.57	20.85	17.12	27.49	23.35
		2					49.24	49.75	40.76	40.79	40.19	41.85	42.44	34.64	57.15	45.58
83	Bi	1	—	—	—	—	23.40	23.64	19.45	19.50	19.15	19.94	20.38	15.68	26.96	21.63
		2					47.85	48.36	39.45	39.50	38.87	40.53	41.24	33.61	55.65	44.05
84	Po	1					22.77	23.02	18.82	18.96	18.75	19.34	19.74	16.05	—	—
		2			—	—	46.52	47.04	38.17	38.47	37.52	38.26	39.26	32.43		
87	Fr	1	—		—	—	21.09	—	17.12	17.49				14.50		
		2			—	—	42.84	—	34.54	35.41				29.41		
88	Ra	1		—	—	—	20.52	20.76	16.50	17.03	18.16	17.14	17.78	14.15	25.86	18.57
		2		—	—	—	41.73	43.25	33.54	34.45	33.07	34.65	35.07	28.51	48.80	37.33
90	Th	1	—	—	—	—	19.51	19.76	15.52	16.17	15.38	16.15	16.83	13.30	23.30	17.42
		2					39.62	40.13	31.48	32.68	31.04	32.54	34.14	25.93	46.58	35.27
91	Pa	1		—	—	—	19.04	19.28	15.12	15.77	14.92	15.66	16.47	12.90	22.40	16.91
		2					38.62	39.13	30.71	31.81	30.09	31.08	33.39	25.97	45.50	34.21
92	U	1	—				18.58	18.82	14.67	15.38	14.47	15.24	16.07	12.51	23.31	16.41
		2	—				37.67	38.18	29.78	31.04	28.17	30.75	32.45	25.12	44.46	33.18
93	Np	1	—	—			18.13		14.27	14.99				12.15	—	—
		2	—	—			36.73	—	28.55	30.21	—	—		24.45		

表10-19 元素谱线-2θ表 [石英(10$\bar{1}$1), 2d = 6.686][1]

原子序	元素	n	K_{α}	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{γ_1}	L_{γ_2}	L_{l}	L_{η}
15	P	1	—	134.01	—	120.46										—
16	S	1	108.95	105.92	107.00	97.62									—	—
17	Cl	1	90.02	89.99	90.05	82.33	—	—	—	—	—	—	—	—		
18	Ar	1	77.67	77.64	77.73											—
19	K	1	68.07	68.05	68.13	62.20										
20	Ca	1	60.32	60.30	60.37	55.04										
		2				135.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	Sc	1	53.94	53.92	53.98	49.13	—	—	—	—	—	—		—	—	—
		2	130.15	130.10	130.38	113.49				—		—				
22	Ti	1	48.57	48.54	48.61	44.17										
		2	110.67	110.59	110.81	97.52		—	—	—	—	—	—	—	—	
23	V	1	44.00	43.98	44.05	39.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	97.05	96.98	97.18	86.90				—			—			
24	Cr	1	40.07	40.05	40.12	36.34				—						
		2	88.51	88.45	88.64	77.16				—		—	—	—		
25	Mn	1	36.67	36.64	36.71	33.20	—	—							—	—
		2	77.96	77.91	78.08	69.69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	Fe	1	33.69	33.66	33.73	30.46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	70.83	70.77	70.94	63.39	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27	Co	1	31.05	31.04	31.11	28.06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	64.75	64.70	64.86	58.00	—	—	—		—	—	—	—	—	—
28	Ni	1	28.74	28.71	28.78	25.93	—	—	—						—	
		2	59.51	59.46	59.61	53.32	—	—	—	—					—	—
29	Cu	1	26.66	26.64	26.71	24.05	—	—								
		2	54.93	54.88	55.03	49.22										
30	Zn	1	24.81	24.79	24.86	22.34										
		2	50.89	50.84	50.99	45.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31	Ga	1	23.15	23.12	23.19	20.81										
		2	47.31	47.26	47.41	42.36				—	—		—	—		
32	Ge	1	21.64	21.62	21.69	19.44										
		2	44.11	44.06	44.21	39.47			—	—	—	—	—	—	—	—
33	As	1	20.28	20.26	20.33	18.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	41.23	41.18	41.33	36.87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
34	Se	1	19.04	19.02	19.09	17.07					—		—	—		—
		2	38.64	38.59	38.74	34.53	—	—	—	—		—				
35	Br	1	17.91	17.89	17.96	16.04	—									

续表

原子序	元素	n	K_{α}	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_{η}
		2	36.29	36.74	36.39	32.40	—	—	—	—	—	—	—	—		
36	Kr	1	16.88	16.86	16.93	15.10	—						—	—	—	—
		2	34.14	34.09	34.24	30.47	—	—						—	—	—
37	Rb	1	15.94	15.91	15.98	14.24	—				—		—	—	—	—
		2	32.19	32.14	32.29	28.75	—	—	—	—	—	—	—			
38	Sr	1	15.07	15.04	15.12	13.45	—		164.31		144.45	146.51	154.31	—	—	—
		2	30.40	30.35	30.50	27.06	—				—	—	—	—	—	—
39	Y	1	14.27	14.24	14.31	12.72	149.35	149.37	130.57	—	126.97	126.35	132.41	—	—	—
		2	28.76	28.71	28.86	25.60	—	—	—	—	—	—	—	—		
40	Zr	1	13.52	13.50	13.52	12.05	130.49	130.70	131.57	116.38	114.80	115.93	117.30	107.27		162.30
		2	27.24	27.19	27.34	24.22	—	—	—	—	—	—	—			
41	Nb	1	12.84	12.81	12.89	11.43	117.78	118.02	110.45	105.14	105.15	106.16	106.61	97.73	154.10	136.52
		2	25.84	25.79	25.94	22.97	—	—	—	—	—				—	
42	Mo	1	12.26	12.18	12.25	10.85	107.92	108.14	101.47	94.63	97.14	96.56	96.06	93.95	133.63	121.58
		2	24.55	24.50	24.65	21.80	—	—	—						—	—
43	Tc	1	11.58	11.55	11.61	10.34			—	—	—	—	—	—	—	—
		2	23.27	23.24	23.34	20.73	—	—							—	—
44	Ru	1	11.06	11.04	11.11	9.82	92.88	93.09	87.42	81.66	84.29	85.13	84.39	77.43	110.70	102.24
		2	22.23	22.18	22.33	19.72	—	—	—	—	—					
45	Rh	1	10.55	10.52	10.60	9.36	86.85	87.07	81.71	76.31	78.58	76.60	78.75	72.28	102.66	94.60
		2	21.19	21.14	21.29	18.78	—	—	—	—	—	—	—	—		
46	Pd	1	10.07	10.03	10.12	8.93	81.57	81.75	76.64	71.55	74.23	75.01	75.85	67.90	95.58	88.57
		2	20.27	20.17	20.32	17.01	—								—	—
47	Ag	1	9.62	9.60	9.67	8.53	75.82	77.01	72.09	67.76	69.96	70.71	69.40	63.58	89.50	82.72
		2	19.32	19.26	19.42	17.10	—	—	—	—	—					
48	Cd	1	9.22	9.18	9.25	8.15	72.55	72.74	67.96	63.41	66.09	66.82	65.45	59.85	84.14	77.67
		2	18.47	18.42	18.57	16.34					—	—	—	—	—	—
49	In	1	8.81	8.79	8.86	7.80	68.68	68.60	64.24	58.91	62.52	63.27	61.85	56.45	79.35	73.13
		2	17.67	17.62	17.78	15.68	—	—	—	—	—				—	—
50	Sn	1	8.44	8.42	8.49	7.46	65.15	65.33	60.63	56.70	59.26	60.09	58.55	53.34	75.53	69.05
		2	16.93	16.88	17.03	14.96	—	—	—	143.53	152.86		155.91	127.71	—	—
51	Sb	1	8.09	8.07	8.14	7.15	61.91	62.09	57.69	53.77	56.26	56.99	56.56	50.49	71.11	65.31
		2	16.23	16.17	16.33	14.34	—		119.55	128.47	141.11	115.19	137.45	117.07	—	—
52	Te	1	7.77	7.74	7.82	6.86	58.94	59.12	54.75	51.07	53.49	54.21	52.70	47.86	67.55	61.95
		2	15.57	15.52	15.67	13.74	160.37	161.23	132.34	119.11	128.72	131.37	125.40	108.15		
53	I	1	7.45	7.43	7.51	6.58	55.19	56.37	52.12	48.58	50.92	51.84	50.21	45.44	64.26	58.75

续表

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{γ_1}	L_{γ}	L_l	L_η
		2	14.95	14.89	15.05	13.19	140.71	141.67	122.95	110.72	118.57	121.16	116.10	101.15	—	157.68
54	Xe	2	14.45	14.29	14.45	12.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
55	Cs	1	—	—			51.76	51.44	47.32	44.13	46.94	47.61	45.83	41.1	58.49	53.18
		2	13.81	13.75	13.91	12.17	119.78	120.44	108.77	97.45	105.56	105.80	101.77	85.82	155.45	125.07
56	Ba	1			—	—	49.35	45.23	45.16	42.15	44.21	44.03	43.53	38.17	55.52	50.59
		2	13.24	13.23	13.39	11.70	112.22	112.82	100.34	91.97	95.55	99.57	95.83	84.22	130.86	120.76
57	La	1	—	—	—	—	46.58	47.15	43.14	40.29	45.26	42.97	41.58	37.30	53.45	48.38
		2	12.73	12.73	12.85	11.26	105.72	108.25	94.67	87.07	92.26	94.19	90.72	76.67	128.16	110.06
58	Ce	1		—	—		45.25	45.33	41.26	38.58	40.13	42.14	39.95	35.66	51.25	46.64
		2	12.32	12.26	12.42	10.84	105.01	104.50	89.60	82.70	87.44	85.22	85.07	75.57	119.76	103.20
59	Pr	1	—	—			43.77	41.41	39.48	36.95	38.73	39.41	39.24	34.11	49.21	44.14
		2	11.87	11.82	11.99	10.44	94.83	95.40	84.59	78.67	83.08	84.82	81.87	71.82	112.75	97.45
60	Nd	1	—				41.59	41.71	37.81	35.45	37.09	37.81	36.57	32.62	47.18	42.24
		2	11.55	11.39	11.58	10.07	92.30	90.80	80.79	75.03	79.00	80.78	77.99	68.32	106.32	92.21
61	Pm	1	—				38.02	—	36.27	—	—			—	—	
		2	11.06	11.01	11.15	9.68	85.13	—	77.39						—	
62	Sm	1				—	39.43	33.60	34.77	32.69	34.15	34.82	33.84	29.95	43.58	38.76
		2	10.66	10.61	10.77	9.37	82.28	82.77	73.39	68.53	71.87	73.51	71.30	67.15	95.88	85.15
63	Eu	1	—	—	—	—	35.98	37.18	33.38	31.47	32.78	33.46	32.55	26.77	41.58	
		2	10.30	10.25	10.41	9.04	78.74	79.25	70.11	65.64	68.77	75.35	68.20	59.45	91.52	
64	Gd	1	—				35.64	35.83	32.56	30.36	31.49	32.18	31.35	27.55	40.46	35.70
		2	9.95	9.90	10.05	8.73	75.47	75.83	67.34	58.95	65.75	67.37	65.43	56.87	87.50	75.51
65	Tb	1	—	—	—	—	31.37	31.56	33.37	29.15	30.25	30.97	30.19	26.45	39.00	
		2	9.63	9.57	9.73	8.44	72.44	73.50	64.19	60.43	62.97	64.54	62.77	54.46	83.94	—
66	Dy	1	—			—	39.17	33.37	29.54	28.30	29.12	29.82	29.12	25.45	37.67	32.97
		2	9.30	9.25	9.41	8.15	69.63	70.10	61.53	58.00	60.38	61.95	60.38	52.27	80.42	69.16
67	Ho	1	—	—	—		33.01	33.20	29.32	27.11	29.03	28.73	28.09	24.47	36.36	31.59
		2	9.00	8.95	9.11	—	66.93	67.44	59.52	55.90	57.94	59.45	58.05	50.16	77.53	66.80
68	Er	1			—	—	30.95	31.16	27.47	26.17	27.00	27.72	27.10	23.54	35.15	30.46
		2		—	—	—	64.51	64.95	56.69	55.86	55.60	57.22	55.80	48.15	74.31	65.39
69	Tm	1	—	—	—		29.57	30.12	25.45	25.28	26.05	26.71	25.18	22.65	34.20	29.38
		2	—	—	—		62.18	62.62	54.47	51.91	53.52	55.07	53.13	46.34	71.58	60.96
70	Yb	1	—	—			28.56	28.15	27.30	24.44	25.06	25.79	25.33	21.86	32.91	28.32
		2	—	—	—	—	60.01	60.44	52.38	50.09	51.50	52.95	52.02	44.56	69.02	58.58
71	Lu	1	—			—	28.03	28.27	24.78	23.65	24.23	24.85	24.50	21.07	31.98	29.53
		2	—			—	57.95	58.37	50.40	48.50	45.57	51.05	50.22	42.80	66.63	52.46

续表

原子序	元素	n	K_α	K_{α_1}	K_{α_2}	K_{β_1}	L_{α_1}	L_{α_2}	L_{β_1}	L_{β_2}	L_{β_3}	L_{β_4}	L_{β_6}	L_{γ_1}	L_l	L_η
72	Hf	1	—	—	—	—	27.15	27.34	24.72	22.88	23.35	24.05	23.72	20.31	30.30	25.34
		2	—	—	·	—	56.00	56.42	48.51	46.75	47.74	49.22	48.54	41.30	54.35	54.22
73	Ta	1	—	—	—	—	26.31	26.51	22.89	22.15	22.54	23.22	22.95	19.65	29.36	25.42
		2		—	—	—	54.16	54.58	46.77	45.19	46.02	47.47	46.91	39.80	62.26	52.22
74	W	1	—	—	—	—	25.51	25.71	22.10	21.46	21.77	22.46	22.25	18.91	29.07	24.54
		2	—	—	—	—	52.41	52.84	45.09	43.71	44.39	45.82	45.39	38.37	50.26	50.35
75	Re	1	—	—	—	—	24.75	24.94	21.35	20.79	21.05	21.71	21.57	18.26	28.22	23.77
		2			—	—	50.75	51.13	43.49	42.31	42.82	44.25	43.05	37.01	58.38	48.51
76	Os	1	—	—	—	·	24.02	24.21	20.63	20.15	20.32	21.00	20.91	17.64	27.42	22.95
		2	—	—	—	—	49.18	49.60	41.07	40.95	41.32	42.75	42.57	35.71	56.50	46.80
77	Ir	1	—				23.32	23.52	19.92	19.55	19.55	20.32	20.29	17.05	26.55	22.15
		2			—	—	47.63	48.10	40.53	39.71	39.91	41.32	41.26	34.45	54.79	45.19
78	Pt	1					22.65	22.85	19.28	18.97	19.01	19.67	19.70	16.47	25.92	21.42
		2		—	—	—	46.35	46.68	39.14	38.40	38.58	39.95	40.01	33.32	53.25	43.54
79	Au	1	—	·			22.01	22.21	18.65	18.42	18.35	19.05	19.13	15.93	25.22	20.73
		2					44.89	45.31	37.82	37.34	37.25	38.66	38.82	32.16	51.76	42.17
80	Hg	1	—				21.40	21.59	18.05	17.89	17.78	18.46	18.59	15.41	24.55	20.05
		2			—	—	43.59	44.01	36.56	36.24	36.07	37.41	37.68	31.11	50.32	40.75
81	Tl	1	—	—	—		20.81	21.01	17.47	17.36	17.27	17.88	18.06	14.91	23.91	19.42
		2	—	—	—	—	42.34	42.76	35.36	35.18	34.85	36.22	36.60	30.09	48.94	39.45
82	Pb	1	—				20.24	20.44	16.89	16.91	16.67	17.33	17.57	14.43	23.29	18.81
		2			—	—	41.16	41.57	34.17	34.20	33.70	35.06	35.56	29.09	47.52	38.15
83	Bi	1	—	—	—	·	19.70	19.90	16.37	16.45	16.14	16.80	17.09	13.97	22.70	18.22
		2	—	—	—	—	40.02	40.45	33.09	33.30	32.61	33.98	34.57	28.13	46.37	36.92
84	Po	1	—	—	-	·	19.18	19.36	15.86	15.98	15.65	16.29	16.63	13.53	—	—
		2					38.92	39.36	32.08	32.28	31.56	32.95	33.63	27.25		
87	Fr	1		—	—	—	17.72	—	14.45	14.74				12.30	—	—
		2			—	—	35.80	—	29.09	29.73				24.75		
88	Ra	1	—	—	—	—	17.28	17.49	13.98	14.35	13.79	14.45	14.97	11.93	20.11	15.50
		2					34.92	35.40	28.17	28.94	27.72	29.15	30.22	23.96	40.57	31.50
90	Th	1					16.44	16.64	13.14	13.63	13.06	13.62	14.22	11.21	19.20	14.58
		2					33.23	33.65	26.46	27.46	26.10	27.43	28.67	22.57	38.57	29.32
91	Pa	1	—	—	—	·	16.04	16.24	12.75	13.29	12.67	13.22	13.88	10.86	18.78	14.25
		2					32.40	32.83	25.66	26.73	25.30	26.53	27.97	21.86	38.08	28.73
92	U	1					15.65	15.86	12.36	12.96	12.20	12.84	13.54	10.55	18.37	13.83
							31.61	32.03	24.87	26.09	24.53	25.85	27.29	21.19	37.23	27.97
93	Np	1	—	—	—	—	15.28		11.98	12.43		—	—	10.25	—	—
		2					30.83	·	24.10	25.43	—	—		20.58		

表 10-20　元素的特征 X 射线波长表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
3	Li	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	23	—	5.017	150
4	Be	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	11.3	—	10.613	150
5	B	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	6.7	—	17.850	150
6	C	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	4.4	—	27.209	150
7	N	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	3.1603	—	37.822	150
8	O	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	2.3707	—	50.461	150
9	F	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	1.8307	—	65.320	150
10	Ne	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	1.4615	—	82.108	150
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	1.4460	—	—	15
11	Na	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	1.1909	—	100.440	150
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	1.1574	—	102.949	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	1.1726	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	40.76	—	—	100
12	Mg	$K_{\bar{\alpha}}$	$K \leftarrow L$	0.9889	—	120.991	150
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.9558	—	125.141	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.9667	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	25.10	—	—	100
13	Al	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.8338	—	143.473	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.8341	—	143.376	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.7960	—	149.841	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.8059	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	16.98	—	—	100
14	Si	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.7125	—	167.883	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.7127	—	167.787	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.6778	—	176.760	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	12.30	—	—	100
15	P	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.6154	—	194.416	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.6157	—	194.320	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.5804	—	206.019	15
16	S	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.5372	—	222.686	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.5375	—	222.493	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.5032	—	237.738	15
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	8.3400	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$				1
17	Cl	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.4728	—	252.983	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.4731	—	252.886	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.4403	—	271.604	15
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	6.7840	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	6.7250	—	—	1
18	Ar	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.4191	—	285.305	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.4194	—	285.112	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.3886	—	307.989	15
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	5.6212	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	5.6813	—	—	1
19	K	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.3742	—	319.653	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.3745	—	319.364	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.3454	—	346.283	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	4.2700	—	—	100
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	4.7835	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	4.7325	—	—	1
20	Ca	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.3359	0.0965	356.125	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.3362	0.0946	355.835	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.3089	—	387.096	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	3.6393	—	32.901	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	3.595	—	33.191	50
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	4.1042	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	4.0542	—	—	1

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
21	Sc	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.3031	—	394.622	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.3034	—	394.140	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.2780	—	430.321	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	3.1393	—	38.111	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	3.1072	—	38.497	50
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	3.6671	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	3.5200	—	—	1
22	Ti	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.2750	0.140	435.146	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.2753	0.206	434.567	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.2514	—	475.766	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	2.7445	—	43.611	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	2.7074	—	44.190	50
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	3.1423	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	3.0942	—	—	1
23	V	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.2503	—	477.792	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.2507	—	477.020	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.2285	—	523.622	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	2.4309	—	49.207	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	2.3898	—	50.076	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	2.1890	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$				4
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	2.7826	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	2.7375	—	—	1
24	Cr	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.2290	0.198	522.368	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.2294	0.254	521.499	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.2085	—	573.697	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	2.1713	—	55.093	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	2.1323	—	56.058	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.9429	—	—	6
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	2.4840	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	2.4339	—	—	1
25	Mn	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.2102	—	569.066	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.2105	—	568.005	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1910	—	626.185	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.9489	—	61.364	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.9158	—	62.426	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.7575	—	—	6
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	2.2315	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	2.1864	—	—	1
26	Fe	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1936	0.236	617.791	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1940	0.309	616.537	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1757	—	680.892	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.7602	—	67.925	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.7290	—	69.179	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.5742	—	—	6
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	2.0201	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.9730	—	—	1

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/($MJ \cdot mol^{-1}$)	光子能量/($MJ \cdot mol^{-1}$)	近似的相对强度
27	Co	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1789	—	668.638	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1793	—	667.191	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1621	—	738.011	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.600	—	74.776	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.5698	—	76.223	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.4269	—	—	6
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	1.8358	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.7860	—	—	1
28	Ni	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1658	0.289	528.446	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1661	0.357	719.775	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1500	—	797.349	15
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$				15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.1489	—	803.524	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.4595	—	81.915	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.4308	—	83.556	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.3167	—	—	6
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	1.6693	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.6304	—	—	1
29	Cu	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1540	—	776.412	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1544	—	774.482	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1392	—	859.099	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.1381	—	866.046	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.1393	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.3357	—	89.538	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.3079	—	91.467	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.2115	—	—	6
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	1.5297	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.4940	—	—	1
30	Zn	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1435	0.328	833.434	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1439	0.382	831.215	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1296	—	923.454	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.1284	—	931.752	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.2282	—	97.353	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.2009	—	99.572	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.1225	—	—	6
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	1.4081	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.3719	—	—	1
31	Ga	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1340	—	892.579	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1344	—	890.939	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1207	—	990.221	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.1196	—	1000.063	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.1208	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.1313	—	105.747	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.1045	—	108.256	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	1.0365	—	—	3
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	1.2976	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.2620	—	—	1
32	Ge	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1255	0.362	953.750	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1258	0.403	950.759	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1129	—	1059.497	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.1117	—	1070.980	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.1129	—	—	15

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
32	Ge	L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	1.0456	—	112.501	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	1.0194	—	117.325	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.9580	—	—	3
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.9640	—	—	2
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	1.1944	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.1608	—	—	1
33	As	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1175	—	1017.237	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1179	—	1013.764	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.1057	—	1131.282	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.1045	—	1144.597	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.1058	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.9671	—	123.693	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.9414	—	127.070	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.8930	—	—	6
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	1.1069	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	1.0732	—	—	1
34	Se	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1105	0.396	1082.554	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1109	0.427	1078.794	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0992	—	1205.575	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0980	—	1220.627	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0993	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.8990	—	133.052	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.8735	—	136.912	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.8321	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$				4
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	1.0293	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.9959	—	—	1
35	Br	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.1040	—	1150.386	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.1044	—	1145.948	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0933	—	1282.280	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0921	—	1299.165	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0933	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.8375	—	142.797	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.8126	—	147.235	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.7767	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$				4
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.9583	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.9253	—	—	1
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	19.26	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	19.11	—	—	1
36	Kr	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0980	0.408	1220.337	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0984	0.446	1215.417	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0879	—	1361.591	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0866	—	1380.984	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0879	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.7817	—	153.121	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$				10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.7576	—	158.042	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.7264	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.7304	—	—	4
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.8946	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.8626	—	—	1
37	Rb	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0926	—	1292.315	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0930	—	1286.622	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0829	—	1443.410	15

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
37	Rb	K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0817	—	1465.022	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0830	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.7318	—	163.445	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.7325	—	163.252	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.7075	—	169.041	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.6788	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.6821	—	—	4
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.6045	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.8363	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.8042	—	—	1
		M_{ξ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	12.87	—	—	1
		M_{ξ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	12.77	—	—	1
38	Sr	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0875	0.499	1366.608	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0880	0.480	1360.143	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0783	—	1527.737	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0771	—	1551.762	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0784	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.6863	—	174.251	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.6870	—	174.155	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.6623	—	180.619	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.6367	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.6403	—	—	4
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.5644	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.7836	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.7517	—	—	1
		M_{ξ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	10.87	—	—	1
		M_{ξ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	10.80	—	—	1
39	Y	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0829	—	1443.120	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0833	—	1435.884	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0740	—	1614.766	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0728	—	1641.299	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0741	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.6449	—	185.448	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.6456	—	185.250	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.6211	—	192.583	50
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.5983	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.6018	—	—	4
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.5283	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.7356	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.7040	—	—	1
		M_{ξ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	9.340	—	—	1
		M_{ξ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
40	Zr	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0786	0.550	1521.948	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0791	0.507	1513.843	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0701	—	1704.497	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0690	—	1733.732	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0702	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.6070	0.162	197.022	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.6077	0.147	196.829	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.5836	0.180	204.933	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.5586	0.495	214.099	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.5632	0.531	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.5668	0.540	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.5384	0.322	222.108	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.4953	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ・mol⁻¹)	光子能量/(MJ・mol⁻¹)	近似的相对强度
40	Zr	L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.6918	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.6606	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	3.839	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	8.210	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
41	Nb	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0747	—	1602.995	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0751	—	1593.926	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0665	—	1796.640	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0654	—	1828.480	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0666	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.5725	—	208.986	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.5732	—	208.696	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.5492	—	217.766	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.5238	—	228.379	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.5310	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.5346	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.5036	—	237.545	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.4654	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.6517	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.6210	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	3.490	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	7.219	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
42	Mo	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0709	0.658	1686.358	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0713	0.656	1676.227	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0632	—	1891.774	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0621	—	1926.219	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0633	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.5406	0.179	221.239	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.5414	0.174	220.950	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.5176	0.196	231.081	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.4923	0.511	242.948	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.5013	0.569	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.5048	0.558	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.4726	0.363	253.079	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.4380	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.6150	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.5847	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	3.270	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	6.438	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
43	Tc	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0675	—	1776.281	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0679	—	1768.370	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0601	—	1986.135	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0590	—	2027.334	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0602	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.5114	—	233.879	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.5123	—	233.493	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.4887	—	244.878	80
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.4636	—	257.999	30
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.4737	—	—	3
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.4773	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.4440	—	269.385	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.4138	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.5819	—	—	5
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.5518	—	—	2

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
43	Tc	M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	3.010	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	5.950	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
44	Ru	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0643	0.715	1860.030	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0647	0.768	1847.584	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0572	—	2089.374	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0562	—	2129.608	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0573	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.4846	0.196	246.808	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.4854	0.191	246.422	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.4620	0.210	258.868	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.4372	0.526	273.630	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.4487	0.613	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.4532	0.575	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.4182	0.400	285.980	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.3897	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.5503	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.5204	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	2.685	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	5.234	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
45	Rh	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0613	—	1950.340	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0617	—	1936.639	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0546	—	2192.227	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0535	—	2235.452	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0546	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.4597	—	260.122	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.4605	—	259.737	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.4374	—	273.437	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.4130	—	289.550	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.4253	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.4289	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.3944	—	303.348	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.3685	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.5217	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.4922	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	2.5000	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	4.767	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
46	Pd	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0585	0.849	2043.061	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0590	0.888	2027.913	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0521	—	2297.877	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0510	—	2344.286	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0521	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.4368	0.213	273.823	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.4376	0.208	273.341	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.4146	0.278	288.489	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.3909	0.543	306.049	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.4034	0.656	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.4071	0.596	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.3725	0.434	321.101	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.3489	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.4952	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.4660	—	—	1

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
46	Pd	M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	2.330	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	4.360	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
47	Ag	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0559	—	2138.291	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0564	—	2121.503	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0497	—	2406.519	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0487	—	2455.919	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0498	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.4154	—	287.910	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.4162	—	287.331	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.3935	—	304.023	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.3703	—	323.030	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.3834	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.3870	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.3523	—	339.529	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.3307	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.4707	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.4418	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	2.1800	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	3.977	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
48	Cd	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0535	0.946	2235.741	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0539	1.003	2217.409	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0475	—	2517.573	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0465	—	2570.446	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0476	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.3956	0.234	302.286	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.3965	0.232	301.707	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.3739	0.245	319.943	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.3514	0.562	340.398	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.3644	0.698	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.3681	0.606	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.3336	0.466	358.537	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.3137	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.4480	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.4193	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	2.046	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	3.680	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
49	In	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0512	—	2335.603	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0517	—	2315.630	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0455	—	2631.521	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0445	—	2687.964	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0455	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.3752	—	317.145	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.3781	—	316.373	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.3555	—	336.442	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.3339	—	358.247	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_1$	0.3470	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.3507	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.3162	—	378.220	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2980	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.2926	—	—	<1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.4269	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.3983	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.921	—	—	5

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
49	In	M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	3.320	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
50	Sn	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0491	1.081	2438.166	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0495	1.196	2416.167	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0435	1.139	2748.171	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0426	···	2808.281	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0436	1.061	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.3600	0.253	332.293	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.3609	0.253	331.425	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.3385	0.265	353.327	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.3175	0.589	376.676	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.3306	0.743	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.3344	0.637	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.3001	0.545	398.578	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2835	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.2778	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.4071	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.3789	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.794	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	3.124	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
51	Sb	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0470	—	2543.045	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0475	—	2519.116	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0417	—	2867.812	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0408	—	2931.878	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0418	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.3439	—	347.827	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.3448	—	346.862	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.3226	—	341.845	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.3023	—	395.537	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.3152	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.3190	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2852	—	419.419	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2695	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.2639	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.3888	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.3607	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.692	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	2.888	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
52	Te	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0451	1.235	2650.528	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0456	1.274	2624.381	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0400	1.283	2990.347	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0391	—	3058.369	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0401	1.188	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.3290	0.278	363.650	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.3299	0.278	362.539	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.3077	0.286	388.736	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2882	0.603	414.930	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.3009	0.793	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.3046	0.658	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2712	0.540	440.935	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2567	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.2511	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.3716	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.3438	—	—	1

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ・mol⁻¹)	光子能量/(MJ・mol⁻¹)	近似的相对强度
52	Te	M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.593	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	2.672	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
53	I	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0433	—	2760.424	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0438	—	2731.961	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0384	—	3125.329	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0376	—	3185.536	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0385	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.3148	—	379.860	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.3157	—	378.799	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2937	—	407.165	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2751	—	434.856	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2874	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2912	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2582	—	463.126	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2447	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$				2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.2391	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.3557	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.3280	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.501	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	2.465	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
54	Xe	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0416	1.370	2875.434	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0421	1.457	2844.848	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0369	1.476	3246.128	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0360	—	3323.509	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.3015	0.304	3966.482	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.3025	0.304	3953.939	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2803	0.309	426.655	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2626	0.620	455.407	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2745	0.839	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2784	0.690	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2462	0.574	485.896	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2338	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.2331	—	—	2
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.3421	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.3143	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.418	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	2.302	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
55	Cs	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0401	—	2988.128	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0405	—	2954.648	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0355	—	3375.417	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0346	—	3455.982	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0355	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2892	—	413.533	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2902	—	412.182	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2683	—	445.759	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2511	—	476.248	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2628		—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2666	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2348	—	509.439	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2237	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.2233	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.2174	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.3267	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2994	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.342	—	—	5

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
55	Cs	M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	2.169	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
56	Ba	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0385	1.553	3105.936	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0390	1.621	2954.648	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0341	1.752	3413.239	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0333	—	3594.534	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0342	1.544	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2776	0.327	430.997	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2785	0.333	429.453	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2567	0.333	465.828	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2404	0.646	497.475	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2516	0.888	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2555	0.716	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2442	0.613	533.656	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2138	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.2134	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.2075	—	—	<1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.3135	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2862	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.2700	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	2.064	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
57	La	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0371	—	3226.445	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0376	—	3187.176	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0328	—	3647.021	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0320	—	3736.656	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0329	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2665	—	448.750	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2674	—	447.206	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2458	—	486.572	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2303	—	519.473	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2410	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2449	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2141	—	558.549	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.2046	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.2041	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1983	—	—	<1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.3006	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2740	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.488	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_4 \leftarrow N_6$	1.451	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.2064	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.944	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
58	Ce	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0357	1.795	3349.656	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0362	1.881	3307.106	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0316	1.988	3787.503	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0309	—	3881.672	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0317	1.732	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2561	0.357	466.985	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2570	0.365	465.345	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2356	0.360	507.702	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2208	0.662	541.568	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2311	0.936	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2349	0.755	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.2048	0.651	583.925	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1960	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1955	—	—	2

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol^{-1})	光子能量/(MJ·mol^{-1})	近似的相对强度
58	Ce	L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1899	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2892	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2620	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.406	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	1.378	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.1534	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.835	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
59	Pr	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0344	—	3475.665	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0349	—	3429.835	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0305	—	3931.362	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0297	—	4030.355	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0305	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2463	—	485.703	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2473	—	483.774	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2259	—	529.604	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2119	—	564.435	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2216	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2255	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1961	—	609.976	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1879	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1874	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1819	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2784	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2512	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.3343	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	1.306	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.0997	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.738	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
60	Nd	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0332	2.074	3604.568	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0337	2.074	3554.975	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0294	2.243	4078.308	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0287	—	4177.590	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0294	2.058	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2370	0.379	504.614	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2382	0.394	502.492	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2166	0.386	552.085	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.2035	0.693	587.591	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2126	0.994	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2166	0.786	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1878	0.691	636.991	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1801	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1797	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1745	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1855	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2675	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2409	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.2675	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	1.2440	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.0504	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.6460	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
61	Pm	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0321	—	3729.033	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0325	—	3681.852	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0283	—	4240.016	15

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
61	Pm	K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0276	—	4337.465	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0284	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2283	—	524.008	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2292	—	521.789	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.2081	—	574.662	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1956	—	611.326	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.2042	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2081	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1799	—	664.875	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1729	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1724	—	—	2
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2591	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2322	—	—	1
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	1.0050	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.5680	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
62	Sm	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0309	2.509	3871.348	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0314	2.383	3813.351	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0274	2.475	4380.401	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0267	—	4491.648	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0274	2.378	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2199	0.398	543.787	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2210	0.434	541.182	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1998	0.418	598.783	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1882	0.716	635.544	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1962	1.042	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.2000	0.830	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1779	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1726	0.724	692.759	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1659	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1655	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1606	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2482	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2218	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.1470	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_4 \leftarrow N_6$	1.1270	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.9599	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.4910	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
63	Eu	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0299	—	4006.910	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0304	—	3944.001	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0264	—	4537.381	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0258	—	4654.514	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0265	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2120	—	564.049	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2131	—	561.154	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1920	—	622.905	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1812	—	660.148	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1887	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1926	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1657	—	721.512	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1597	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1591	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1544	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2395	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2131	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.0960	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
63	Eu	M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	1.0744	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.9211	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.4220	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
64	Gd	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0289	2.846	4147.198	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0294	2.702	4079.369	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0255	2.834	4700.537	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0249	—	4820.467	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0256	2.702	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.2046	0.430	582.670	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.2057	0.473	581.513	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1847	0.447	647.798	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1746	0.743	685.234	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1815	1.081	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1853	0.876	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1592	0.755	751.422	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1534	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1529	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1485	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2312	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.2049	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.0460	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	1.0253	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.8844	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.3570	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
65	Tb	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0279	—	4290.670	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0284	—	4219.947	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0246	—	4861.955	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0239	—	4991.824	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0246	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1976	—	605.441	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1986	—	602.160	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1777	—	673.366	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1682	—	710.899	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1747	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1785	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1577	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1530	—	781.911	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1477	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1471	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1427	—	—	<1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2234	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1973	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	1.0000	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.9792	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.8485	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.2980	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
66	Dy	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0270	3.271	4436.844	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0275	3.107	4360.429	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0237	3.158	5034.373	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0231	—	5161.058	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0238	3.088	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1909	0.464	626.667	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1920	0.516	623.001	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1710	0.485	699.417	50

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
66	Dy	L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1623	0.762	736.949	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1681	1.110	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1720	0.926	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1473	0.801	812.207	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1423	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1417	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1374	—	—	<1
		L_{ι}	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2158	—	—	3
		L_{η}	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1898	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.9590	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_{β}	$M_4 \leftarrow N_6$	0.9364	—	—	80
		M_{γ}	$M_3 \leftarrow N_5$	0.8144	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.2430	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
67	Ho	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0261	—	4585.720	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0266	—	4504.480	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0230	—	5203.800	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0224	—	5334.827	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0231	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1845	—	648.377	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1856	—	644.517	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1647	—	726.336	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1567	—	763.386	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1619	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1658	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1417	—	844.047	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1371	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1364	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1323	—	—	<1
		L_{ι}	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2086	—	—	3
		L_{η}	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1826	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.9200	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_{β}	$M_3 \leftarrow N_6$	0.8965	—	—	80
		M_{γ}	$M_3 \leftarrow N_5$	0.7865	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.1860	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
68	Er	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0253	3.609	4737.297	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0258	3.425	4651.040	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0222	3.493	5373.227	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0217	—	5508.113	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0223	3.445	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1785	0.499	670.375	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1796	0.553	666.130	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1587	0.526	753.545	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1514	0.799	790.016	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1561	1.143	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1601	0.968	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1364	0.844	876.949	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1321	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1315	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1276	—	—	<1
		L_{ι}	$L_3 \leftarrow M_1$	0.2019	—	—	3
		L_{η}	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1757	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.8820	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_{β}	$M_3 \leftarrow N_6$	0.8593	—	—	80
		M_{γ}	$M_3 \leftarrow N_5$	0.7545	—	—	5

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
68	Er	M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.1370	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
69	Tm	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0244	—	4894.664	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0250	—	4801.267	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0215	—	5555.197	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0210	—	5689.600	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0216	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1726	—	692.856	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1738	—	688.418	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1530	—	781.815	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1463	—	817.418	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1505	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1544	—	—	4
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1316	—	909.271	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1274	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1268	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1229	—	—	<1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1955	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1695	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.8460	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_4 \leftarrow N_6$	0.8246	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.7318	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.0920	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
70	Yb	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0236	4.052	5051.934	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0241	3.917	4952.169	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0208	3.997	5725.554	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0203	—	5881.605	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0209	3.970	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1672	0.521	715.337	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1682	0.600	710.802	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1476	0.569	810.567	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1416	0.828	845.012	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1452	1.177	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1491	1.061	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1387	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1268	0.888	943.523	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1228	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1222	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1185	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1243	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1894	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1635	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.8139	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.8155	—	—	50
		M_β	$M_4 \leftarrow N_6$	0.7909	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.7023	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	1.0480	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$				1
71	Lu	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0229	—	5216.247	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0234	—	5109.728	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0202	—	5912.769	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0197	—	6073.320	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0203	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1619	—	738.493	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1630	—	733.669	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1424	—	840.284	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1370	—	872.993	20

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
71	Lu	L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1402	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1441	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1342	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1222	—	978.547	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1185	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1179	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1143	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1198	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1836	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1478	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$ }	0.7840	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$ }				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.7600	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.6761	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$		—		1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	1.0070	—	—	1
72	Hf	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0222	4.371	5379.692	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0227	4.274	5266.033	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0195	4.438	6098.695	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0190	—	6265.324	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0196	4.448	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1569	0.563	762.035	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1580	0.646	756.729	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1374	0.614	870.388	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1327	0.861	901.745	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1353	1.196	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1392	1.235	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1298	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1179	0.929	1014.439	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1144	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1138	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1103	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1155	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1782	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1523	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.7539	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.7546	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.7304	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.6543	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$ }	0.9686	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$ }				1
73	Ta	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0215	—	5550.180	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0220	—	5429.188	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0190	—	6291.761	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0185	—	6464.372	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0191	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1522	—	785.867	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1533	—	780.271	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1327	—	901.263	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1285	—	930.980	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1307	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1346	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1256	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1138	—	1050.910	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1105	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1099	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1065	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1114	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1728	—	—	3

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
73	Ta	L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1471	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.7251	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.7258	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.7022	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.6312	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.9316	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.9330	—	—	1
74	W	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0209	4.607	5722.502	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0213	4.631	5593.502	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0184	5.001	6486.949	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0179	—	6666.121	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0185	4.969	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1476	0.627	810.085	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1487	0.695	804.006	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1282	0.666	933.006	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1245	0.874	960.890	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1263	1.264	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1302	1.409	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1215	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1098	0.984	1088.636	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1068	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1062	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.1028	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1074	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1678	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1421	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.6983	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.6990	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.6756	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.6088	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.8962	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.8993	—	—	1
75	Re	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0202	—	5898.200	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0207	—	5760.806	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0179	—	6686.190	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0174	—	6871.633	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0179	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1433	—	834.688	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1444	—	828.224	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1238	—	965.618	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1206	—	991.186	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1220	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1260	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1177	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1061	—	1127.326	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.1032		—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.1026	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0993	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1037	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1630	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1374	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.6729	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.6504	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.5887	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.8629	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.8664	—	—	1
76	Os	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0196	5.114	6077.661	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0201	4.766	5931.584	50

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
76	Os	K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0173	5.393	6889.386	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0169	—	7081.294	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0174	5.398	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1391	0.679	859.678	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1402	0.743	852.924	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1197	0.716	999.002	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1169	0.926	1022.351	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1179	1.049	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1218	1.592	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1140	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.1025	1.028	1166.885	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0998	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0992	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0959	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.1001	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1585	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1328	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.6490	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$				50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.6267	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.5681	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.8310	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.8359	—	—	1
77	Ir	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0191	—	6260.500	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0196	—	6105.353	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0168	—	7096.346	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0164	—	7294.718	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0169	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1352	—	885.053	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1363	—	877.817	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1158	—	1032.964	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1135	—	1053.419	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1141	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1179	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1106	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0991	—	1206.926	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0966	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0959	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0928	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0967	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1541	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1285	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.6261	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.6275	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.6037	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.5501	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.8021	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.8065	—	—	1
78	Pt	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0185	5.818	6447.101	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0190	5.239	6282.209	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0163	5.787	7307.358	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0159	—	7512.870	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0164	5.995	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1313	0.733	910.911	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1325	0.799	903.096	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1120	0.772	1067.988	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1102	0.960	1085.355	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1104	1.553	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1142	1.737	—	4

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ · mol⁻¹)	光子能量/(MJ · mol⁻¹)	近似的相对强度
78	Pt	L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1072	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0958	1.081	1248.414	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0934	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0928	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0897	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0934	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1499	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1243	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.6046	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.6057	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.5828	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.5319	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.7738	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.7790	—	—	1
79	Au	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0180	—	6637.562	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0185	—	6462.539	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0159	—	7522.711	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0155	—	7734.688	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0160	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1277	—	936.962	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1288	—	928.664	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1083	—	1103.687	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1070	—	1117.485	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1068	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1106	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1040	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0927	—	1290.867	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0905	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0898	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0867	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0903	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1460	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1202	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.5840	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.5854	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.5623	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.5145	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.7466	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.7523	—	—	1
80	Hg	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0175	6.247	6833.136	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0180	6.580	6647.210	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0154	6.344	7743.661	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0150	—	7962.488	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0155	6.653	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1242	0.782	963.592	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1253	0.849	954.812	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1049	0.839	1140.737	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1040	1.003	1150.386	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1034	1.679	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1072	1.901	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.1010	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0897	1.139	1334.189	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0876	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0869	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0839	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0873	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1422	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1164	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.5648	—	—	50

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/ $(MJ \cdot mol^{-1})$	光子能量/ $(MJ \cdot mol^{-1})$	近似的相对强度
80	Hg	M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.5677	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.5452	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.4984	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.7232	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.7250	—	—	1
81	Tl	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0170	—	7029.868	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0175	—	6784.797	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0150	—	7965.576	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0146	—	8191.928	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0151	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1207	—	990.511	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1218	—	981.248	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.1015	—	1178.077	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.1010	—	1183.673	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.1001	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1039	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0981	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0868	—	1378.572	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0848	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0842	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0812	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0845	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1385	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1127	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.5461	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.5472	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.5249	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.4825	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.6974	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.7032	—	—	1
82	Pb	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0165	6.590	7232.196	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0170	7.522	7023.500	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0146	6.966	8193.665	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0142	—	8427.254	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0147	7.227	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1175	0.851	1017.816	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1186	0.902	1008.071	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0982	0.902	1216.767	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0983	1.307	1217.636	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0969	1.799	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.1007	2.055	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0953	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0840	1.187	1424.306	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0822	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0815	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0786	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0817	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1350	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.1092	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.5285	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.5299	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.5075	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.4674	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.6740	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.6802	—	—	1
83	Bi	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0161	—	7438.673	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0165	—	7217.531	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0142	—	8426.483	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0138	—	8667.501	5

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
83	Bi	K_{β_3}	K←M_2	0.0143	—	—	15
		L_{α_1}	L_3←M_5	0.1144	—	1045.507	100
		L_{α_2}	L_3←M_4	0.1155	—	1035.183	10
		L_{β_1}	L_2←M_4	0.0952	—	1256.326	50
		L_{β_2}	L_3←N_5	0.0955	—	1252.081	20
		L_{β_3}	L_1←M_3	0.0939	—	—	6
		L_{β_4}	L_1←M_2	0.0977	—	—	4
		L_{β_5}	L_3←$O_{4,5}$	0.0926	—	—	2
		L_{γ_1}	L_2←N_4	0.0814	—	1470.811	10
		L_{γ_2}	L_1←N_2	0.0796	—	—	1
		L_{γ_3}	L_1←N_3	0.0790	—	—	2
		L_{γ_4}	L_1←O_3	0.0761	—	—	<1
		L_{γ_6}	L_2←O_4	0.0791	—	—	1
		L_l	L_3←M_1	0.1317	—	—	3
		L_η	L_2←M_1	0.1058	—	—	1
		M_{α_1}	M_5←N_7	0.5118	—	—	50
		M_{α_2}	M_5←N_6	0.5129	—	—	50
		M_β	M_4←N_6	0.4909	—	—	80
		M_γ	M_3←N_5	0.4531	—	—	5
		M_{ζ_1}	M_5←N_3	0.6521	—	—	1
		M_{ζ_2}	M_4←N_2	0.6585	—	—	1
84	Po	K_{α_1}	K←L_3	0.0156	7.063	7650.843	100
		K_{α_2}	K←L_2	0.0161	8.327	7416.578	50
		K_{β_1}	K←M_3	0.0138	7.584	8665.185	15
		K_{β_2}	K←$N_{2,3}$	0.0133	—	8913.826	5
		K_{β_3}	K←M_2	0.0139	7.994	—	15
		L_{α_1}	L_3←M_5	0.1114	0.917	1073.681	100
		L_{α_2}	L_3←M_4	0.1125	0.960	1062.681	10
		L_{β_1}	L_2←M_4	0.0922	0.974	1296.850	50
		L_{β_2}	L_3←N_5	0.0929	1.085	1286.912	20
		L_{β_3}	L_1←M_3	0.0909	1.920	—	6
		L_{β_4}	L_1←M_2	0.0948	2.190	—	4
		L_{β_5}	L_3←$O_{4,5}$	0.0900	—	—	2
		L_{γ_1}	L_2←N_4	0.0788	1.259	1518.668	10
		L_{γ_2}	L_1←N_2	0.0772	—	—	1
		L_{γ_3}	L_1←N_3	0.0765	—	—	2
		L_{γ_4}	L_1←O_3	0.0736	—	—	<1
		L_{γ_6}	L_2←O_4	0.0765	—	—	1
		L_l	L_3←M_1	0.1283	—	—	3
		L_η	L_2←M_1	0.1024	—	—	1
		M_{α_1}	M_5←N_7	0.4955	—	—	50
		M_{α_2}	M_5←N_6	0.4958	—	—	50
		M_β	M_4←N_6	0.4736	—	—	80
		M_γ	M_3←N_5	0.4361	—	—	5
		M_{ζ_1}	M_5←N_3	0.6290	—	—	1
		M_{ζ_2}	M_4←N_2	0.6349	—	—	1
85	At	K_{α_1}	K←L_3	0.0152	—	7865.907	100
		K_{α_2}	K←L_2	0.0157	—	7618.038	50
		K_{β_1}	K←M_3	0.0134	—	8907.362	15
		K_{β_2}	K←$N_{2,3}$	0.0131	—	9163.721	5
		K_{β_3}	K←M_2	0.0135	—	—	15
		L_{α_1}	L_3←M_5	0.1085	—	1102.240	100
		L_{α_2}	L_3←M_4	0.1097	—	1090.662	10
		L_{β_1}	L_2←M_4	0.0894	—	1338.531	50
		L_{β_2}	L_3←N_5	0.0905	—	1322.321	20
		L_{β_3}	L_1←M_3	0.0881	—	—	6
		L_{β_4}	L_1←M_2	0.0919	—	—	4
		L_{β_5}	L_3←$O_{4,5}$	0.0875	—	—	2
		L_{γ_1}	L_2←N_4	0.0763	—	1567.582	10

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
85	At	L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0747	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0740	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0713	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0741	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1256	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0997	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.4802	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.4802	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.4581	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.4234	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.6096	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.6156	—	—	1
86	Rn	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0148	7.719	8085.409	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0153	8.635	7822.971	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0131	8.249	9154.169	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0127	—	9418.441	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0132	8.799	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1057	0.968	1131.185	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1069	1.013	1118.932	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0866	1.028	1381.274	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0881	1.124	1358.214	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0854	2.026	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0892	2.316	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0852	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0739	1.037	1617.854	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0725	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0718	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0692	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0717	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1223	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0968	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.4655	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.4657	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.4436	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.4124	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.5911	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.5971	—	—	1
87	Fr	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0144	—	8309.157	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0149	—	8031.668	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0127	—	9405.608	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0124	—	9677.888	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0128	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1030	—	1160.613	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1042	—	1147.588	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0840	—	1425.078	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0858	—	1395.071	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0828	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0867	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0829	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0716	—	1669.280	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0703	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0696	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0670	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0695	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1199	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0938	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.4515	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.4521	—	—	50
		M_β	$M_3 \leftarrow N_6$	0.4303	—	—	80

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
87	Fr	M_{γ}	$M_3 \leftarrow N_5$	0.4008	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.5737	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.5801	—	—	1
88	Ra	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0144	8.394	8537.440	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0149	8.799	8244.223	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0127	9.089	9661.582	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0120	—	9942.545	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0128	9.547	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.1005	1.061	1190.427	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.1017	1.081	1176.533	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0814	1.119	1469.750	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0836	1.177	1431.735	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0803	2.122	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0841	2.431	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0807	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0694	1.380	1721.768	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0682	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0675	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0649	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0673	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1167	—	—	3
		L_{η}	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0908	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.4383	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.4392	—	—	50
		M_{β}	$M_3 \leftarrow N_6$	0.4178	—	—	80
		M_{γ}	$M_3 \leftarrow N_5$	0.3892	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.5579	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.5642	—	—	1
89	Ac	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0140	—	8769.871	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0145	—	8459.866	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0124	—	9923.055	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0117	—	10211.737	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0125	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0980	—	1220.530	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0992	—	1205.961	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0789	—	1515.966	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0814	—	1469.171	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0778	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0816	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0786	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0671	—	1775.799	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0662	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0655	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0630	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0653	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1144	—	—	3
		L_{η}	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0882	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.4256	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.4270	—	—	50
		M_{β}	$M_3 \leftarrow N_6$	0.4060	—	—	80
		M_{γ}	$M_3 \leftarrow N_5$	0.3798	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.5389	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.5489	—	—	1
90	Th	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0133	9.137	9005.294	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0138	9.359	8678.018	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0117	9.620	10188.002	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0114	—	10485.078	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0118	10.131	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0956	1.148	1251.019	100

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
90	Th	L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0968	1.139	1235.775	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0766	1.196	1563.051	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0794	1.235	1507.089	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0755	2.205	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0793	2.542	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0765	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0653	1.447	1830.988	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0642	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0635	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0611	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0632	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1115	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0855	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.4138	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.4151	—	—	50
		M_β	$M_4 \leftarrow N_6$	0.3942	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.3679	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.5245	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.5340	—	—	1
91	Pa	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0131	—	9248.145	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0136	—	8902.731	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0115	—	10459.703	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0111	—	10765.269	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0116	—	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0933	—	1282.377	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0945	—	1265.878	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0742	—	1611.293	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0774	—	1545.876	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0732	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0770	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0746	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0634	—	1887.142	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0624	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0617	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0594	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0613	—	—	1
		L_ι	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1091	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0830	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.4022	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.4035	—	—	50
		M_β	$M_4 \leftarrow N_6$	0.3827	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.3577	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.5092	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.5193	—	—	1
92	U	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0126	9.938	9496.786	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0131	10.227	9132.074	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0111	11.096	10737.675	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0108	—	11052.214	5
		K_{β_3}	$K \leftarrow M_2$	0.0112	11.578	—	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0911	1.196	1313.445	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0923	1.196	1296.560	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0720	1.303	1661.272	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0755	1.283	1584.760	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0710	2.287	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0748	2.653	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0726	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0615	1.515	1945.419	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0605	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0598	—	—	2

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
92	U	L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0577	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0595	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1067	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0806	—	—	1
		M_{α_1}	$M_5 \leftarrow N_7$	0.3910	—	—	50
		M_{α_2}	$M_5 \leftarrow N_6$	0.3924	—	—	50
		M_β	$M_4 \leftarrow N_6$	0.3715	—	—	80
		M_γ	$M_3 \leftarrow N_5$	0.3479	—	—	5
		M_{ζ_1}	$M_5 \leftarrow N_3$	0.4946	—	—	1
		M_{ζ_2}	$M_4 \leftarrow N_2$	0.5050	—	—	1
93	Np	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0123	—	9745.427	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0128	—	9361.225	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0109	—	11016.708	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0105	—	11340.124	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0889	—	1345.478	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0901	—	1230.951	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0698	—	1711.637	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0736	—	1624.511	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0689	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0727	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0708	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0597	—	2004.371	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0587	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0581	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0558	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0577	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1043	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0781	—	—	1
94	Pu	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0120	—	10000.918	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0125	—	9596.069	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0106	—	11302.785	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0103	—	11635.271	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0869	1.274	1377.704	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0880	1.254	1358.696	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0678	1.360	1763.546	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0720	1.341	1664.745	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0669	2.325	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0707	2.731	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0691	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0579	1.582	2064.867	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0571	—	—	1
		L_{γ_3}	$L_1 \leftarrow N_3$	0.0564	—	—	2
		L_{γ_4}	$L_1 \leftarrow O_3$	0.0542	—	—	<1
		L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0560	—	—	1
		L_l	$L_3 \leftarrow M_1$	0.1023	—	—	3
		L_η	$L_2 \leftarrow M_1$	0.0759	—	—	1
95	Am	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0117	—	10261.234	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0122	—	9834.868	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0103	—	11593.879	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0100	—	11935.724	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0849	—	1410.412	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0860	—	1390.440	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0658	—	1816.709	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0701	—	1705.558	20
		L_{β_3}	$L_1 \leftarrow M_3$	0.0649	—	—	6
		L_{β_4}	$L_1 \leftarrow M_2$	0.0686	—	—	4
		L_{β_5}	$L_3 \leftarrow O_{4,5}$	0.0674	—	—	2
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0562	—	2126.714	10
		L_{γ_2}	$L_1 \leftarrow N_2$	0.0554	—	—	1

续表

原子序数	元素	谱线名称	电子跃迁	λ/nm	固有宽度/(MJ·mol⁻¹)	光子能量/(MJ·mol⁻¹)	近似的相对强度
95	Am	L_{γ_6}	$L_2 \leftarrow O_4$	0.0543	—	—	1
96	Cm	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0114	—	10526.277	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0119	—	10077.624	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0101	—	11890.280	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0098	—	12241.484	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0829	1.428	1443.506	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0841	1.312	1422.472	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0639	1.515	1871.126	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0685	1.409	1746.950	20
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0546	1.650	2190.104	10
97	Bk	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0111	—	10796.241	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0116	—	10326.071	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0098	—	12191.987	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0095	—	12552.743	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0810	—	1477.083	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0822	—	1454.891	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0621	—	1926.894	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0669	—	1788.824	20
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0530	—	2254.845	10
98	Cf	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.0108	—	11071.125	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.0113	—	10575.002	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.0097	—	12499.001	15
		K_{β_2}	$K \leftarrow N_{2,3}$	0.0093	—	12869.405	5
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.0792	—	1511.045	100
		L_{α_2}	$L_3 \leftarrow M_4$	0.0804	—	1487.793	10
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.0603	—	1983.916	50
		L_{β_2}	$L_3 \leftarrow N_5$	0.0653	—	1831.278	20
		L_{γ_1}	$L_2 \leftarrow N_4$	0.0515	—	2321.034	10
99	Es	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.01052	—	17236.588	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.01103	—	10829.817	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.00933	—	12811.322	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.07740	—	1545.490	100
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.05850	—	2042.193	50
100	Fm	K_{α_1}	$K \leftarrow L_3$	0.01026	—	11635.850	100
		K_{α_2}	$K \leftarrow L_2$	0.01077	—	11088.589	50
		K_{β_1}	$K \leftarrow M_3$	0.00910	—	13129.142	15
		L_{α_1}	$L_3 \leftarrow M_5$	0.07570	—	1580.321	100
		L_{β_1}	$L_2 \leftarrow M_4$	0.05682	—	2101.917	50

析线净强度与含量之间存在下述关系

$$I_x/I_s=c_x/c_s \tag{10-15}$$

于是，便可求出试样中分析元素含量。

②双标样法　当试样 x 中分析元素含量处于两个标样 s_1 和 s_2 之间，而净强度 I 与含量 c 之间是线性关系时，可得

$$c_x=c_{s_1}+\frac{I_x-I_{s_1}}{I_{s_2}-I_{s_1}}(c_{s_2}-c_{s_1}) \tag{10-16}$$

应用上式，即可测定试样中分析元素的含量。

③校准曲线法　制作一套标样，作出分析线强度与含量关系的校准曲线，测出未知试样中分析线强度，即可从校准曲线上查出相应元素的含量。校准曲线法的特点是简便，但标样的基体组成应与试样一致或相近，若试样的基体复杂，或变化较大，可用稀释法。

(2) 稀释法　对于一无限厚样品，对给定的分析元素和仪器条件，显然 I_i-c_A 校准曲线斜

率的变化取决于分母的联合质量吸收系数 $\bar{u}_m$。为使 I_i-c_A 校准曲线具有较好的线性，$\bar{u}_m$ 值的相对变化应≤5%。稀释法就是用稀释剂将标样与试样以相同的比例稀释，使二者的基体基本相似，以达到稳定 $\bar{u}_m$ 值的目的。必须使稀释剂在 $\bar{u}_m$ 中占据统治地位，达到95%或更高一些。

$$I_i=\frac{K\cdot c_A}{\bar{u}_m} \tag{10-17}$$

（3）薄样法　亦称薄膜法。当一均匀样品的厚度薄至临界厚度时，由波长为 λ 的初级 X 射线激发产生的分析线 i 的强度 dI_i 为

$$dI_i=KI_0dt \tag{10-18}$$

式中，dt 为样品厚度；I_0 为人射到样品表面的初级 X 射线的强度；K 为常数。对于一固定区域面积为 S 的薄层，其中分析元素的原子数 ΔN 正比于 Δt，由此可得

$$\Delta I_i=K^*I_0\Delta N \tag{10-19}$$

这样，对于同一种分析元素，在任意两个含量不同（c_1 和 c_2）的试样中，就存在着

$$c_1/c_2=kI_1/I_2 \tag{10-20}$$

式中，I_1 和 I_2 为对应的分析线强度；k 为常数。式（10-20）不仅适合单色人射线的激发，也适合多色人射线的激发。

在外标法中，应用上述原理进行定量分析时，必须保证试样均匀和厚度固定。薄样法能有效地克服元素间的吸收和激发效应。

2. 内标法

内标法是在试样中加人一已知量的标准元素 s，其谱线的波长与分析元素 A 的分析线相近，通过测定它们的强度比以进行定量分析。因标准元素 s 需引入试样之内，故称之为内标元素。所选用的内标元素的谱线称为内标线，分析线与内标线合在一起称为分析线对，它们的强度分别以 I_A 和 I_s 表示，分析线对的强度比与基体无关，正比于分析元素与内标元素的浓度比，即

$$c_A/c_s=kI_A/I_s \tag{10-21}$$

式中 k 为换算系数，可用已知分析元素和内标元素含量的标样事先求出。由于在此法中引入的元素 s 为已知量，因此在测出分析线对的强度后，可用（10-21）式，或利用一组标样制出的 I_A/I_s-c_A 校准曲线，求出试样中分析元素的含量。

内标法可有效地补偿元素间的吸收-增强效应和长时间的仪器漂移，以及部分地补偿粉末和样品的密度变化，提高测定结果的准确度。

3. 增量法

增量法是一种标准加入法，就是在待测的试样中加入一定量的分析元素或含有分析元素的标样，以进行试样中分析元素的测定。常用的增量法有：

（1）加入已知量的分析元素　在一份称量过的试样中，若此试样分析元素含量为 c_x，则加入一已知量的分析元素经混合后其含量增至 $c_{x+\Delta x}$，由测量处理前后试样中分析线强度 I_x 和 $I_{x+\Delta x}$，可得出：

$$\frac{I_x}{I_{x+\Delta x}}=\frac{c_x}{c_{x+\Delta x}} \tag{10-22}$$

$$c_x=\frac{I_x}{I_{x+\Delta x}-I_x}\cdot c_{\Delta x} \tag{10-23}$$

（2）多重增量法　取多个同量的原样，分别与不同量的分析元素混合，形成一组新的试

表 10-21 各种经验校正方程的比较[1]

文献	按原文献符号列出的方程	按本表的统一符号列出的方程	以 A_{ij} 代替比较的系数	解出 C_i/R_i 后的方程
(1) 谢尔曼[illegible]	$(\alpha_{ii}-k)C_i+\alpha_{ij}C_j+\alpha_{ik}C_k=0$	$(1/R_i-1)C_i-\sum_{j\neq i}\alpha_{ij}C_j=0$	$(\alpha_{ij}/\alpha_{ii})-1$	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j$
(2) 比蒂-布里西[illegible]	$(1-R_i)/W_i+\sum_{i\neq j}A_{ij}W_j=0$	$(1-1/R_i)C_i+\sum_{j\neq i}\alpha_{ij}C_j=0$	$\alpha_{ij}-1$	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j$
(3) [illegible]	$R/R_0=P_1/(P_1+KP_2)$	$R_i=C_i/(C_i+\alpha C_j)$	$\alpha-1$	$C_i/R_i=1+A_{ij}C_j$（只适用二元系）
(4) [illegible]	$\alpha C_i+C_i\cdot a_i[\alpha C_i-\sum_{j\neq i}a_jI_j]$	$[\alpha C_i-I_i(\alpha_iC_i+\sum_{j\neq i}\alpha_jC_j)]$（本底预先校正）	$(\alpha_jI_{(p)i}/\alpha)-1$	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j$
(5) 拉尚斯-特雷尔[illegible]	$R_i=C_i/(1+\sum_{j\neq i}\alpha_{ij}C_j)$	$R_i=C_i/(1+\sum_{j\neq i}\alpha_{ij}C_j)$	α_{ij}	$C_i/R_i=1-\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j$
(6) [illegible]	$R=C_i/(\Sigma\alpha_{ij}C_j)$	$R_i=C_i/(\Sigma\alpha_{ij}C_j)$	$\alpha_{ij}-1$	$C_i/R_i=1-\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j$
(7) 卢卡斯-图思和普赖斯[illegible]	$P_{im}=a_i+I_{im}(K_i+\Sigma K_{ij}I_{jm})$	$C_i=a_i+I_i(b_i+\Sigma\alpha_{ij}I_j)$	$\alpha_{ij}I_{(p)i}I_{(p)j}$	$C_i/R_i=a_i/R_i+b+\Sigma A_{ij}R_j$
(8) 卢卡斯-图思和派恩[illegible]	$\left[\begin{array}{l}P_{im}=a_i+P'_{im}(K_i+\Sigma K_{ij}P'_{jm})\\P'_{im}=pI_{im}\end{array}\right]$	$C_i=a_i+pI_i(b+\Sigma\alpha_{ij}pI_j)$	$\alpha_{ij}p^2I_{(p)i}I_{(p)j}$	$C_i/R_i=a_i/R_i+b+\Sigma A_{ij}R_j$
(9) 吉利姆[illegible]	$P_{im}=a_i+I_i(K_i+\Sigma K_{ij}I_j)$	同卢卡斯-图思和普赖斯	—	—
(10) [illegible]	$C_i=C_{i0}(K_i-\Sigma K_{ij}C_{j0})$	$\left[\begin{array}{l}C_i=pI_i(b-\Sigma\alpha_{ij}pI_j)\\类似于卢卡斯-图思和派恩\end{array}\right]$	$\alpha_{ij}p^2I_{(p)i}I_{(p)j}$	$C_i/R_i=b+\Sigma A_{ij}R_j$
(11) 克莱斯-昆廷[illegible]	$C_{ai}/R_a=1+\sum\alpha_{ai}C_i+\sum\sum\alpha_{aij}C_iC_j$	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}\alpha_{ij}C_j+\sum\sum\beta_{ijk}C_jC_k$	α_{ij}（β_{ij}类似）	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j+\sum\sum B_{ijk}C_jC_k$
(12) 拉斯伯里-海因里希[illegible]	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j+\sum_{k\neq i}\frac{B_{ik}C_k}{1+C_i}$	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}\alpha_{ij}C_j+\sum_{k\neq i}\frac{\beta_{ik}C_k}{1+C_i}$	α_{ij}（β_{ij}类似）	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j+\sum\frac{B_{ik}C_k}{1+C_i}$
(13) [illegible]	$C_i=R_i\left[1+\sum_{j\neq i}(a_{ij}+b_{ij}C_i)C_j\right]\frac{1}{1-a_i}$	$C_i=R_i\left[1+\sum_{j\neq i}(\alpha_{ij}+\beta_{ij}C_i)C_j\right]\frac{1}{1+\epsilon}$	α_{ij}（β_{ij}类似）	$C_i/R_i=\left[1+\sum_{j\neq i}(A_{ij}+B_{ij}C_i)C_j\right]\frac{1}{1-\epsilon}$
(14) [illegible]	$C_i=R_i(1+\sum\alpha_jC_j+\sum\alpha_{jj}C_j^2+\sum\sum\alpha_{jk}C_jC_k)$	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}\alpha_{ij}C_j+\sum_{j\neq i}\alpha_{ijj}C_j^2+\sum\sum\beta_{ijk}C_jC_k$	α_{ij}（β_{ij}类似）	$C_i/R_i=1+\sum_{j\neq i}A_{ij}C_j+\sum A_{ijj}C_j^2+\sum\sum B_{ijk}C_jC_k$

样，根据这组试样测出的分析线的净强度，与多次不同的增量作出关系曲线，然后用外推法，将曲线延长至分析线强度的零点，即可读出原样中分析元素的含量。

4. 散射比法

试样在吸收初级 X 射线并发射次级特征 X 射线的同时，亦散射同一 X 射线束形成连续背景和相干、非相干靶峰。这些辐射均受试样组成、浓度和各种物理性质相似的影响，因而次级特征 X 射线与散射线的比值受基体的影响是不灵敏的，这就为校正基体效应提供了一种方法，即散射比法。散射线可以是连续谱，相干散射靶线和非相干散射靶线。这是一种无需加入标准试剂的一种特殊内标法。

在应用本法于实际测定时，以分析线 i 的强度 I_i 与所选波长 λ 的本底强度 $I_{s,\lambda}$之比（即 $I_i/I_{s,\lambda}$）对分析元素 A 的含量 c_A 作出校准曲线，即可进行样品的测定。散射比法简便易行，可补偿基体吸收、粒度、密度，形状和测定条件波动的影响，对轻基体中微量元素的测定尤为有利。

5. 数学校正法

数学校正法是用数学方法处理测量数据并校正元素间的基体效应。数学校正法可分为经验系数法和基本参数法两类。

（1）经验系数法　具有简便、快速、准确的特点，近来市售 X 光谱仪普遍带有联机软件程序，这样更利于推广使用。常用的经验系数法有个别三元法、回归法和理论计算法，用来确定共存元素的影响系数 α，其中回归法应用得最多。应用经验系数法，已经建立了多种型式的校正方程，如表 10-21 所示。在经验系数法中，对于含量与强度关系的方程组，在确定了相互作用系数之后，都可以运用代数的方法，直接求出试样中各元素含量。

（2）基本参数法　是根据分析线的测量强度和三种基本参数（初级谱线强度分布、质量吸收系数、荧光产额）的数值，计算分析元素浓度的一种方法。根据基本激发方程推导出基本参数方程，测出试样和标样特征分析线强度，用迭代法计算出试样中分析元素的浓度。基本参数法的参数方程和计算都非常复杂，但新近上市的 X 射线光谱仪都备有基本参数法计算程序，只需调用程序即可。

Nielson 等[5]最近研究了通用的背景散射基本参数法，此法适用于直接用 X 光管激发的系统，对提高实验室分析自动化非常有价值。Rousseau[6]评述了基本参数法和经验系数法的最新进展。近年来，数学校正法在我国也得到了广泛的普及和应用，推出了许多新模型[7~10]。

三、样品的制备

样品制备是一项技术性较强的工作，也是影响分析结果的关键之一。这里将固体、粉末、液体试样等，在不同的分析要求，不同的来样量时，所用的种种制备方法简述如下。

（一）固体试样

固体试样可以是块状、粒状、板状、膜状、棒状、筒状、针状、线状等各种形状。原则上，要求保证有一非常光洁和足够幅宽的测定面，因分析要求不同，制样技术也不一样。

1. 难加工试样

试样的测定面一般要求有 ϕ(5～40) mm，在这一范围内尽可能选择最光洁的部分进行测定。线状和针状试样可采用平排固定的方式，如图 10-1 所示。



图 10-1　固体试样的处理方法

2. 易加工试样

(1) 机械加工法　较硬试样可用车床、铣床、切割机、磨床等加工出平面；较软试样可用油压机压制。在加工时要注意，试样表面不要残留下切削油或切削残渣，加工后一定要用酒精将测定面清洗干净。

(2) 溶解-铸造法　若金属试样可能有较严重的偏析，则须用离心铸造机进行试样的铸造成型。

用上述方法加工有困难的试样，如岩石、烧结物等，则须先粉碎然后加压成型。

(二) 粉末试样

粉末试样的处理方法，因试样粒度和取样量不同而异。为提高定量分析精度，尽可能粉碎成细粉状态，然后加压制成片状。

1. 试样需原样回收

(1) 微量取样法　所取试样总量不超过 1mg，处理方法最好是将粉末试样放置在 5μm 的聚丙烯膜载体上，准确称量之后连载体一起放入样品槽。本法不适用于偏析较严重的试样，也不适用于吸湿性强的试样和粒度较大的试样。

(2) 额定量取样法　称取一定量的试样 (10mg～1g) 于图 10-2 所示的压模轻轻地压成具有一定面积和一定厚度的片状样品，直接进行测定。

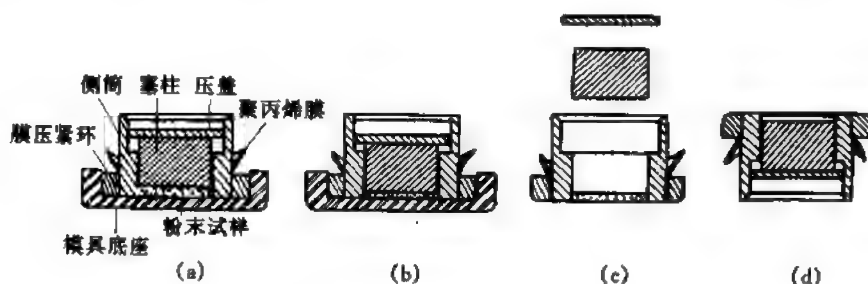


图 10-2　额定量粉状试样的处理

(a) 将粉末试样装入试样压模；(b) 将压盖的螺口扭紧，将试样轻压成型；(c) 采用下部照射方式时，将压盖和塞柱取出来后进行测定 (这样 X 射线的背景小，可以得到较好的结果)；(d) 采用上部照射方式时压盖和塞柱原封不动，即可进行测定 (测定轻元素时最好不用聚丙烯膜成型)

2. 原试样不必回收

(1) 粉碎-加压成型法　将试样用振动磨床、平面磨床，喷射磨床等粉碎成所要求的粒度

后，用电动或手动油压机加压成型。通常的试样用钢模加压制成片状，象玻璃粉等粘结性差的粉末试样可采用金属环压片法，如图 10-3 所示。成形压力因试样而异，通常加压（10～30）t。试样量足够多时，仅用待测试样粉碎成型即可。试样量不足时，可与纤维素粉末或硼酸锂等载体充分混合加压成型。

（2）熔融法　将试样与熔剂放入白金坩埚中精确称量，于熔融装置中熔融、退火、冷却得到熔珠状试样。熔剂可采用硼酸钠或硼酸锂，试样量在（0.3～3）g 范围内约加 3g 熔剂。熔融时，熔珠不能残存气泡，所以较费时间。最近生产的熔融装置有的带有自动除气泡的振荡设备。本法适用于基体效应较严重的试样，另外当试样量较少时，采用此法可得到比上面介绍的加压成型法更均匀，偏析少的样品，定量测定较好。

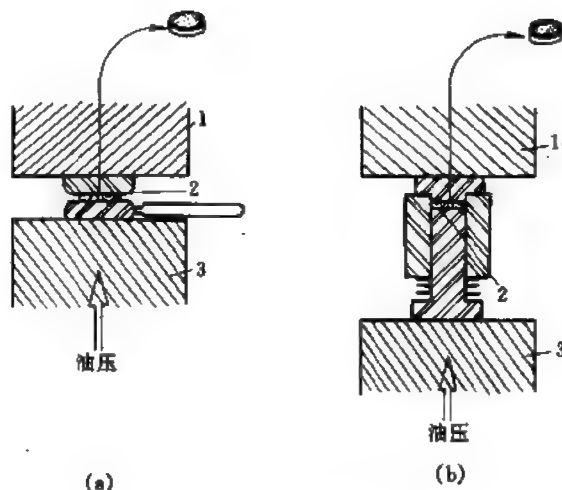


图 10-3　加压成型法

（a）金属环压片法；（b）模具压片法

1—受压盘；2—粉末试样；3—加压盘

（3）其他处理方法　除上面提到的样品外，还有一些特殊样品，如大气中漂浮的尘埃、表面腐蚀生成物等微量粉末。前者可用采样器将粉尘捕集在滤膜上，后者可采用微量取样法，或者用适当的溶剂制成溶液。

（三）液体试样

1. 通常浓度的试样

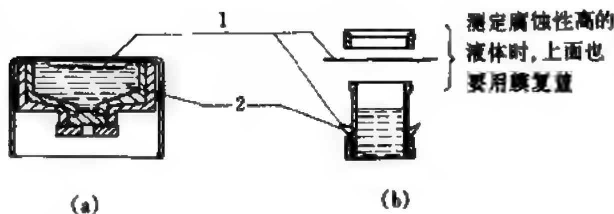


图 10-4　液体样品池

（a）上面照射时用；（b）下面照射时用

1—聚酯或聚丙烯膜；2—液体试样

（1）试样量较多时　可用 X 射线分析仪专用的液体样品池进行测定。图 10-4 所示为两种液体样品池。采用下部照射方式，装样时要确保试样不会洒落或溢出；采用上部照射方式，特别是当试样挥发性高时，则需用底部带有针孔的特殊容器。

（2）试样量有限时　用同一基体溶液稀释至一定浓度，或取一定体积的试样进行分析，操作如图 10-5 所示。

（3）微量试样时　与微量粉末试样的处理方法相同，以薄膜作为试样的支持体，用微量移液管移取一定量的试样滴在薄膜上，如图 10-6 所示。

2. 极低浓度的试样

（1）物理浓缩法　将试液准确地转移到滤纸、色谱纸或聚酯膜上，蒸发至干，进行测定。也可将一定量试液蒸发至饱和，再转移到纤维素上，经干燥、磨匀和压片，进行测定。

（2）沉淀法　采用适当的沉淀剂，利用沉淀或共沉淀作用，将待测元素富集于沉淀物中，

再将沉淀物收集于滤纸片上，干燥后进行测定。

(3) 萃取法　以有机溶剂萃取试液中的待测元素，萃取后在离子交换纸上形成点滴；或萃取后将有机相蒸发，吸收在纤维素中，经磨匀后压片；或萃取后吸收在滤纸片上，然后进行测定。

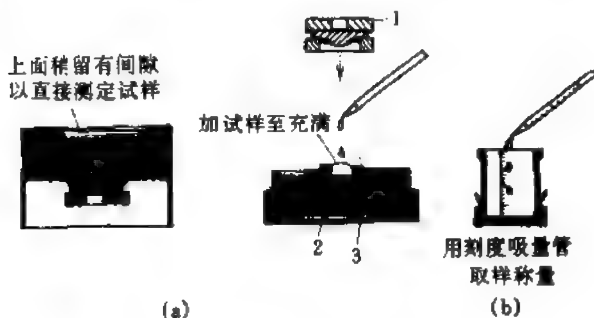


图 10-5　额定量液体试样的处理

(a) 从上面照射时；(b) 从下面照射时

1—容器底部；2—聚丙烯膜；3— 容积调节器

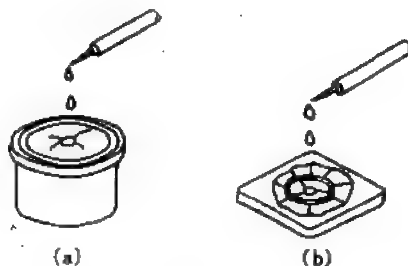


图 10-6　微量液体试样的处理

(a) 从上面照射时；(b) 从下面照射时

(4) 离子交换法　利用离子交换树脂或螯合树脂收集试液中的痕量元素。常用的方法有动态法和静态法。动态法是将颗粒状的离子交换树脂装于玻璃柱中，然后使试液以一定流速通过离子交换柱，再以酸性淋洗液收集待测元素。静态法是将离子交换纸或离子交换膜悬浮于试液中，也可将颗粒状或液态的离子交换树脂加入试液中。当离子交换达到平衡后，取出纸片或薄膜，经冲洗、干燥，就成为待测试样；液体树脂用移液法分离，放入样品池，以液态进行测量；颗粒状树脂用过滤法分离，经干燥后压片，即可进行测量。

参 考 文 献

1 谢忠信，赵宗铃，张玉斌等编著. X射线光谱分析. 北京：科学出版社，1982. 518页
2 Robinson J W. ed. Practical Handbook of Spectroscopy, USA: CRC Press Inc, 1991: 711
3 Rene'E V G, Andrzej A M, ed. Handbook of X-Ray Spectrometry, New York: Marcel Dekker Inc, 1993: 35—36, 54—59
4 杭州大学化学系分析化学教研室编. 分析化学手册，第三分册. 北京：化学工业出版社，1983. 978页
5 Nielson K K, Rogers V C. Adv X-Ray Anal, 1984; 27: 449
6 Rousseau R M. Adv X-Ray Anal, 1994; 37: 639
7 Wang Y Z. X-Ray Spectrom, 1993; 22(5): 352
8 孙建一. 地质实验室. 1992; 8 (4): 197
9 Yap C T, Hua Y N. Appl Spectrosc, 1993; 47(12): 2052
10 Hua Y N, Yap C T. X-Ray Spectrom, 1994; 23(1): 27
11 Burnham H D, Hower J, Jones L C. Anal Chem, 1957; 29: 1827
12 Sherman J. Adv X-Ray Anal, 1958; 1: 231
13 Sherman J. Amer Soc Test Mater Spec Tech Publ, 1954; 157: 27
14 Beattie H J, Brissey R M. Anal Chem, 1954; 26: 980
15 Guinier A. Rev Universelle Mines, 1961; 143: 17
16 Marti W. Spectrochim Acta, 1962; 18: 1409
17 Marti W. Spectrochim Acta, 1961; 17: 379
18 Lachance G R. Can Dept Mines Tech Surv Geol Surv Can, Paper 64—50. 1964; 8
19 Lachance G R. Can Spectrosc, 1970; 15: 64
20 Lachance G R, Traill R J. Can Spectrosc, 1966; 11(2): 43
21 Traill R J. Lachance G R. Geol Surv Can Pap 64—57, 1965: 22
22 Traill R J, Lachance G R. Can Spectrosc, 1966; 11(3): 63
23 Criss J W, Birks L S. Anal Chem, 1968; 40: 1080
24 Lucas-Tooth H J, Price B J. Matallrgia, 1961; 64: 149
25 Lucas-Tooth H J, Pyne E C. Adv X-Ray Anal, 1964; 7: 523

26 Gillieson A M, Reed D J, Milliken K S et al. Amer Soc Test Mater Spec Tech Publ, 1965; 376: 3
27 Thiele B. Siemens Z, 1970; 44: 707
28 Claisse F, Quintin M. Can Spectrosc, 1967; 12: 129
29 Heinrich K F J. The Electron Microprobe, Mekinley E D, Heinrich K F J, Wittry D B ed. John Wiley N Y, 1966; 296
30 Heinrich K F J, Basberry S D. Adv X-Ray Anal, 1974; 17: 309
31 Heinrich K F J. Adv X-Ray Anal, 1976; 19: 75
32 Rasberry S D, Heinrich K F J. Int Spectrosc Colloq 16th, Heidelberg Band I, 1971: 337
33 Rasberry S D, Heinrich K F J. Anal Chem, 1974; 46: 81
34 Tertian R. X-Ray Spectrom, 1973; 2: 95
35 Tertian R. X-Ray Spectrom, 1974; 3: 102
36 Tertian R. X-Ray Spectrom, 1975; 4: 52
37 Tertian R. Adv X-Ray Anal, 1976; 19: 85
38 Tertilan R, Vie le Sage R. X-Ray Spectrom, 1977; 6: 123
39 Rousseau R, Claisse F. X-Ray Spectrom, 1974; 3: 31

第十一章 X射线光谱分析的主要仪器设备

第一节 X射线光谱仪的基本组成

一、X射线激发源

在X射线光谱分析中，就激发方式而言，主要可分为两类，一类是用荷电粒子直接轰击样品的原级激发，另一类是以X射线光子照射样品的次级激发。

1. 原级激发源

以高速电子直接轰击样品，这是最简单的一种原级激发。将样品装在一个可拆式X射线管的靶面上，即构成一个原级激发装置。现代的电子探针和扫描电子显微镜，就是沿用这种电子激发方式，不同之处在于它们是以一种经过聚焦的微电子束来激发样品，故适用于微区分析。

由于荷电粒子原级激发要比电子激发有利得多，近年来，已越来越多地以质子、α粒子或其他重离子来代替电子，用于样品的原级激发。

2. 次级激发源

次级激发，即X射线光子激发。次级激发源，通常称之为X射线发生器。X射线发生器由高压发生器及X射线管所组成。高压发生器为X射线管提供（10～100）kV稳定的直流高压，最大输出电流为（50～100）mA，稳定度优于±0.05%～0.005%。

各种类型的X射线管在设计原理上是类似的，但一些主要的结构参数又随用途而异，常用的X射线管有下述几种。

（1）侧窗型X射线管　这是一种最常用的X射线管，它的窗口位于管头的侧面，在准直管正对窗的位置开一小孔，作为X射线的出口。这种结构的优点是可以减轻灯丝物质对靶面和管窗的玷污，且可遮挡偏离聚焦方向的杂散电子。

（2）端窗型X射线管　这种管子的窗口位于管头的端部，它的阴极灯丝环绕着阳极卷绕，靶面焦斑呈圆环状。端窗型X射线管常用于多道型仪器。

（3）双靶X射线管　这种管子的结构与侧窗管相似，不同之处在于：靶面有两个分开的独立区域，其一为钨，其二为铬；每一靶面各有一组灯丝，并各自具有靶面焦斑，加热哪一组灯丝可通过外部开关来选择，避免操作时更换管子的麻烦，特别适用于自动程序控制型仪器。

（4）可拆式X射线管　可拆式X射线管可根据需要更换靶材，靶面或灯丝一旦损坏，容易更换，样品可放在管外紧挨管窗，也可移入管内紧挨靶面焦斑位置。由于上述优点，在现代X射线光谱仪中，可拆式X射线管广泛用于长波和超长波X射线的激发上。为限制管窗的吸收，这种管子多采用无窗和超薄窗结构。

近年来，X射线管在向三个方向发展，一是高、低功率管，二是多元靶，三是超高真空或无窗管。功率高达20kW的X射线管[1]已用于波散X荧光分析（WDXRF），18kW的旋转靶X射线管[2]亦用于双晶X荧光分析仪分析化学价态。在能散X荧光分析（EDXRF）中高功率管用作荧光二次靶，可得到较好的检出限[1]。低功率管常用作EDXRF的直接激发源。Leyden

等[3]将9W低功率管用于合金和涂料的X射线光谱分析。Bacon等[2]推出了一个Ag、Cu，Fe，Ge，Mo五元靶、人工操作电磁机械，换靶不破坏真空。用此管测得的检出限要比同位素激发源测得的检出限好。Kikkert等[4]介绍了一种新型双靶X光管，这种X光管，在重元素靶上有一轻元素薄层，对于轻元素激发，采用较低的千伏电压，对于重元素激发，采用较高的千伏电压。De Koning等[5]通过地化样品和玻璃的分析，对双靶X光管作了评述。Witmer等[6]研制了一种采用辉光放电的开窗管，将其安装在一个改进的波长色散谱仪上，可用于测定样品中的B，C，N，O和F等超轻元素，也可用来作薄层分析，还可测定元素的价态及结合形式。Wobrauschek等[7]设计的无窗细聚焦型AG30标准X射线管，可避免低能韧致辐射的吸收，有效地激发低Z元素。目前正在发展的X射线源还有激光等离子体光源和X射线激光。

二、分光系统

无论是原级还是荧光X射线光谱法，其色散均可采用波长色散或能量色散两种不同的方式。不管二者在仪器和方法上有多大区别，但对色散来说其目的是一样的，即都是为了将分析元素的谱线从其他特征谱线分离开，以便对其进行检测。到目前为止，波长色散法的适用性仍然比较广泛，但能量色散法近年来发展也很快，在某些领域的应用中，两者几乎已经达到足相匹敌的地步。

1. 准直器

准直器的作用在于截取一发散的X射线，使之成为平行光束，投射到分析晶体或探测器窗口上。常用的准直器有单狭缝和多狭缝之分，在样品与分析晶体之间常配用多狭缝准直器（入射准直口），而在探测器前则采用单狭缝准直器（出射准直口）。

2. 分析晶体

分析晶体是利用晶体的衍射现象使不同波长的X射线分开，以便从中选择被测元素的特征谱线进行测定。在波长色散中，目前广泛采用的仍是晶体色散法。在长波段，还有利用光栅衍射和全反射方法等。对于晶体色散来说，可以分为平面晶体和弯面晶体两类。利用平面晶体进行色散的方法主要有布拉格-索勒法、劳厄法、边晶法和双晶法等。弯面晶体色散法可分为横向聚焦法与纵向聚焦法两类。横向聚焦法又可分为透射式聚焦法（包括科舒瓦法和杜蒙德法）和反射式聚焦法（包括约翰法和约翰逊法）两种。纵向聚焦法主要有哈蒙斯法和孔策尔法。各种不同晶体色散方法的比较详见表11-1。

表11-1 各种不同色散方法的比较[1]

色散方法	光学特性	优点	缺点
平面晶体	晶体切于聚焦圆	几何光学简单，谱线的展宽度不太依赖于θ	X射线需经准直，分辨率决定于准直器和晶体的摆动角
边晶	反射面直接平行于晶体边缘的表面，一次反射全部的光谱	可用底片一次记录全部光谱，应用探测器记录时，只需它本身移动；结构简单	强度低，不同波长发生于样品不同区域，对样品的均匀性要求很高
科舒瓦	晶体圆半径为R，聚焦圆半径为$R/2$，透射式。反射面正交于晶体表面。焦散圆半径为$R\sin\theta$	对于样品或探测器截取的立体角大	X射线穿过晶体时受到很大的衰减（主要是吸收）
约翰	晶体圆与聚焦圆的半径同科舒瓦法，反射式，反射面平行于晶体表面	X射线衍射成线焦点，因而只需要一个简单的狭缝，接受角相当大	反射线严重散焦

续表

色散方法	光学特性	优点	缺点
约翰逊	晶体的外径为 R，内径为 $R/2$，聚焦圆的半径为 $R/2$，无焦散圆	类似于约翰法，但不散焦	某些晶体由于机械强度的限制，不适用于此法
回转式	晶体和探测器沿固定的罗兰圆周运动	仪器紧凑，传动机构简单	晶体依次瞄向样品的不同区域，对样品均匀性要求很高，由于X射线出射方向变化大，故出射狭缝也较大
直进式	晶体沿一直线移动，并绕自轴旋转，探测器沿四叶玫瑰线运动	晶体连续地瞄向样品的同一区域，出射角保持固定，可作选择区域分析	仪器结构比较复杂，占用空间亦较大
恒距式	在晶体与X射线源的距离固定的条件下，晶体自动弯曲，R 连续地随 θ 变化，$R\propto\sin\theta$	对于相当宽的波段，只需使用一种晶体	某些散焦是不可避免的，只限于弹性形变的晶体
对数螺线式	依分析线波长需要，晶体按对数螺线方程弯曲，晶面上各点与入射X射线成等角（θ）	晶体不需要经过磨制而可以起较好的聚焦作用，分辨率优于约翰法	有一定的散焦，分辨率不如约翰逊法

对分析晶体的选择，最基本的是它的衍射强度，色散率和分辨率必须合乎元素测定上的要求，而且应当具有优良的指标。在X射线光谱分析中常用分析晶体的种类及主要性能见表11-2。

表 11-2 常用分析晶体的种类及主要性能[12]

分析晶体	晶面指数(hkl)	2d 值/nm	化学式	实用波长范围 λ/nm ($2\theta=10°\sim145°$)	使用说明
1. α-石英，二氧化硅	(502)	0.1624	SiO_2	0.0142～0.155	2d 值最小的分析晶体用于 100kV 发生器激发高原子序元素的K线分析更好
2. 氟化锂	(422)	0.1652	LiF	0.0144～0.158	同样应用时比石英(502)好
3. 刚玉，氧化铝	(146)	0.1660	Al_2O_3	0.0145～0.158	使用与石英(502)同
4. 氟化锂	(420)	0.180	LiF	0.0157～0.172	相似于 LiF(422)
5. 黄玉	(303)	0.2712	$Al_2(F,OH)_2SiO_4$	0.0236～0.259	对 V-Ni 的K线及稀土的L线色散有改善
6. 刚玉，氧化铝	(030)	0.2748	Al_2O_3	0.0240～0.262	衍射强度2～4倍于黄玉(303)及石英(203)，分辨率相同或更好
7. α-石英，二氧化硅	(203)	0.2749	SiO_2	0.0240～0.262	使用与黄玉(303)及 LiF(220)同
8. 黄玉	(006)	0.2795	$Al_2(F,OH)_2SiO_4$	0.0244～0.267	
9. 氟化锂	(220)	0.2848	LiF	0.0248～0.272	使用与黄玉(303)及石英(203)同，衍射强度2～4倍 衍射强度相当于 LiF(200)的 0.4～0.8
10. 云母	(331)	0.300	$K_2O\cdot3Al_2O_3\cdot6SiO_2\cdot2H_2O$	0.0262～0.286	光学透光晶体
11. α-石英，二氧化硅	(211)	0.3032	SiO_2	0.0269～0.294	—
12. α-石英，二氧化硅	(112)	0.3636	SiO_2	0.0317～0.347	—
13. 硅	(220)	0.384	Si	0.0335～0.366	—
14. 萤石，氟化钙	(220)	0.3862	CaF_2	0.0337～0.368	—

续表

分析晶体	晶面指数(hkl)	2d 值/nm	化学式	实用波长范围 λ/nm ($2\theta=10°\sim145°$)	使用说明
15. 锗	(220)	0.400	Ge	0.0349～0.382	—
16. 氟化锂	(200)	0.4027	LiF	0.0351～0.384	K 的 K 系线至 Lr 的 L 系线的最好通用晶体 对大多数元素均具有最大的强度与高色散相结合
17. 铝	(200)	0.4048	Al	0.0353～0.386	—
18. α-石英，二氧化硅	(102)	0.4564	SiO_2	0.0398～0.435	—
19. 黄玉	(200)	0.464	$Al_2(F,OH)SiO_4$	0.0405～0.443	—
20. 铝	(111)	0.4676	Al	0.0408～0.446	—
21. 石膏	(002)	0.4990	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	0.0435～0.476	—
22. 岩盐，氯化钠	(200)	0.5641	NaCl	0.0492～0.538	对 SK 线至 LrL 线象 LiF(200)好的分析晶体
23. 方解石，碳酸钙	(200)	0.6071	$CaCO_3$	0.0529～0.579	用作波长测量很精确
24. 磷酸二氢铵，ADP	(112)	0.614	$NH_4H_2PO_4$	0.0535～0.586	—
25. 硅	(111)	0.6271	Si	0.0547～0.598	在中等和高原子序元素的测定中无二级衍射的干扰
26. 钾盐，氯化钾	(200)	0.6292	KCl	0.0549～0.600	—
27. 萤石，氟化钙	(111)	0.6306	CaF_2	0.0550～0.602	二级衍射很弱，三级衍射强
28. 锗	(111)	0.6532	Ge	0.0570～0.623	无二级衍射干扰 用作中间及低原子序元素，用脉冲分析器消除 GeKα 发射干扰
29. 溴化钾	(200)	0.6584	KBr	0.0574～0.628	—
30. α-石英，二氧化硅	(101)	0.6687	SiO_2	0.0583～0.638	低原子序基体，特别是钙中的磷的 K_α 对 P～K 的 K 线，强度大于 EDdt，但小于 PET
31. 石墨	(002)	0.6708	C	0.0585～0.64	P，S，Cl 的 K 谱线 PKα 强度 > 5 × EDdt，相对分辨率不好
32. 柠檬酸氢铵	?	0.738	CH_2COONH_4 | $C(OH)COOH$ | CH_2COONH_4	0.0644～0.704	—
33. 磷酸二氢铵，ADP	(200)	0.75	$NH_4H_2PO_4$	0.0654～0.716	强度高于 EDdt
34. 黄玉	(002)	0.8374	$Al_2(F,OH)SiO_4$	0.0730～0.799	—
35. α-石英，二氧化硅	(100)	0.852	SiO_2	0.0742～0.812	使用与 EDdt 及 PET 相同，分辨率较高，但强度较低
36. 季戊四醇，PET	(002)	0.8742	$C(CH_2OH)_4$	0.0762～0.834	Al，Si，P，S，Cl 的 K_α 线 强度为 EDdt 的 1.5～2 倍，为 KHP 的 2.5 倍 为 Al～Sc K_α 的良好通用晶体，背景低，易变质，不用时须存放于干燥器中

续表

分析晶体	晶面指数(hkl)	2d 值/nm	化学式	实用波长范围 λ/nm (2θ=10°～145°)	使用说明
37. 酒石酸铵	?	0.880	$COONH_4$—CHOH—CHOH—$COONH_4$	0.0767～0.84	—
38. 二乙胺-d酒石酸，EDdt	(020)	0.8808	NH_2—CH_2—CH_2—NH_2 / COOH—$(CHOH)_2$—COOH	0.0768～0.84	应用与PET同，但强度较低
39. 磷酸二氢铵	(101)	1.0640	$NH_4H_2PO_4$	0.0928～1.015	Mg $K_α$ 应用与PET、EDdt同，但强度较低
40. 二水草酸	(001)	1.192	COOH—COOH·$2H_2O$	0.104～1.137	—
41. 山梨糖醇六乙酸酯，SHA	(110)	1.398	CHOH—$COCH_3$ / (COH—$COCH_3$)$_4$ / CHOH—$COCH_3$	0.122～1.334	应用与ADP(101)及石膏(020)相似
42. 蔗糖	(001)	1.512	$C_{12}H_{22}O_{11}$	0.132～1.442	—
43. 石膏	(020)	1.5185	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	0.132～1.449	Na 的 $K_α$ 不如KHP及RHP
44. 绿柱石	(100)	1.5954	$3BeO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	0.139～1.522	
45. 钛酸铋	(040)	1.640	$Bi_2(TiO_3)_3$	0.143～1.565	—
46. 2-亚甲基丁二酸	(020)	1.850	CH_2COOH—C(=CH_2)—COOH	0.161～1.765	—
47. 云母	(002)	1.984	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	0.173～1.893	可变半径的弯晶光谱仪
48. 乙酸银	(001)	2.00	CH_3COOAg	0.174～1.908	—
49. 蔗糖	(100)	2.012	$C_{12}H_{22}O_{11}$	0.175～1.919	—
50. 邻苯二甲酸氢铊	(100)	2.59	C_6H_4(—COOTl)(—COOH)	0.226～2.47	应用与KHP、RHP相似
51. 邻苯二甲酸氢铷，RHP	(100)	2.612	C_6H_4(—COORb)(—COOH)	0.228～2.492	对Na、Mg、Al的 $K_α$ 线及Cu $L_{α_1}$ 线衍射强度约3倍于KHP；对F $K_α$ 约4倍于KHP；对O的 $K_α$ 约8倍于KHP
52. 邻苯二甲酸氢钾	(100)	2.6632	C_6H_4(—COOK)(—COOH)	0.232～2.541	小于氧的全部低原子序数元素的良好通用晶体
53. 斜绿泥石	(001)	2.839	$H_8Mg_5Al_2Si_3O_{18}$	0.248～2.709	O $K_α$ 强度约4倍于KHP，但仅为硬脂酸铅的1/5
54. 叶绿泥石	(001)	2.84	$H_4Mg_3SiO_9$	0.248～2.71	应用与斜绿泥石相似
55. 环己烷-1,2-二乙酸氢钾	—	3.12	C_6H_{10}(—CH_2COOK)(—CH_2COOH)	0.272～2.976	
56. 十四酰胺	—	约5.4	$CH_3(CH_2)_{12}CONH_2$	0.471～5.15	低至C $K_α$ 超长波长范围的分析
57. 顺丁烯酸氢十六烷酯，HHM	—	5.80	$CH_3(CH_2)_{15}OOC$—CH=CH—COOH (HOOC—CH)	0.506～5.53	低至C $K_α$ 超长波长范围的分析
58. 顺丁烯酸氢十八烷酯，OHM	—	6.35	$CH_3(CH_2)_{17}OOC$—CH=CH—COOH (HOOC—CH)	0.554～6.06	低至C $K_α$ 超长波长范围的分析
59. 月桂酸铅，十二(烷)酸铅	LBF	约7.0	$[CH_3(CH_2)_{10}COO]_2Pb$	0.610～6.68	低至B $K_α$ 超长波长范围的分析

续表

分析晶体	晶面指数(hkl)	2d值/nm	化学式	实用波长范围λ/nm (2θ=10°~115°)	使用说明
50. 肉豆蔻酸铅，十四(烷)酸铅，LTD	LBF	8.05	$[CH_3(CH_2)_{12}COO]_2Pb$	0.702~7.[illegible]	低至B $K_α$超长波长范围的分析
51. 软脂酸铅，十六(烷)酸铅	LBF	约9.0	$[CH_3(CH_2)_{14}COO]_2Pb$	0.785~8.59	低至B $K_α$超长波长范围的分析
52. 硬脂酸铅，十八(烷)酸铅，LOD	LBF	10.04	$[CH_3(CH_2)_{16}COO]_2Pb$	0.875~9.58	低至B $K_α$超长波长范围的分析
53. 花生酸铅，二十(烷)酸铅	LBF	约11.0	$[CH_3(CH_2)_{18}COO]_2Pb$	0.96~10.5	低至B $K_α$超长波长范围的分析
54. 山嵛酸铅，二十二(烷)酸铅	LBF	约12.0	$[CH_3(CH_2)_{20}COO]_2Pb$	1.05~11.4	低至B $K_α$超长波长范围的分析
55. 棕榈酸铅，二十四(烷)酸铅，LTE	LBF	约12.6	$[CH_3(CH_2)_{22}COO]_2Pb$	1.14~12.4	低至Be $K_α$超长波长范围的分析
66. 二十六(烷)酸铅	LBF	约14.0	$[CH_3(CH_2)_{24}COO]_2Pb$	1.22~13.4	低至Be $K_α$超长波长范围的分析
67. 蜂花酸铅，三十(烷)酸铅，LTC	LBF	约15.6	$[CH_3(CH_2)_{28}COO]_2Pb$	1.40~15.6	低至Be $K_α$超长波长范围的分析
68. 顺丁烯二酸氢廿二烷酯，BHM[13]	—	约7.4	$CH_3(CH_2)_{21}OOC-CH=CH-COOH$	0.645~7.06	适用于超长波区，可到B $K_α$
69. 对苯二酸十八烷酯，OTO[13]		约8.4	$COO(CH_2)_{17}CH_3$ （苯环） $COO(CH_2)_{17}CH_3$	0.732~8.01	适用于超长波区，可到B $K_α$，结晶性良好
70. 己二酸十八烷酯，OAO[13]	—	约9.4	$(CH_2)_4[COO-(CH_2)_{17}CH_3]_2$	0.82~8.97	适用于超长波区，可到B $K_α$，结晶性很好
71. 丁二酸氢十八烷酯，OHS[13]	—	约9.7	$CH_3(CH_2)_{17}OOC-CH_2CH_2COOH$	0.846~9.25	适用于超长波区，可到B $K_α$
72. 十八烷酸癸酸铅，LSD[13]	LBF	约10.0	$CH_3(CH_2)_{16}COO-PbOOC(CH_2)_8CH_3$	8.72~95.4 0.872~9.54	适用于超长波区，可到B $K_α$

分光系统近来最大的进展是人工合成多层显微结构(LSM)[1]。这是一种由高Z元素层和低Z元素层交替组成的复合物，每层具有不同的成分和厚度，在真空中喷镀到具有光学平面的石英基片上，产生几个原子厚的薄层。这些合成“晶体”，衍射效率高，分辨率好。Huang等[8]用LSM测定了B、C、N和O。Takemura等[9]用LSM大大改进了轻元素的检出限。Charbonnier等[10]报道了两种新的有机晶体，一是用三苯基苯代替ADP来测定水泥和其他含钙基体中的Mg，此晶体有很高的反射性和很好的分辨率，二是用酒石酸铊代替TAP来测定Na和Mg。

三、探 测 器

探测器的作用是将X光子的能量转化为电能，然后通过电子线路测量和记录下来。常用的探测器有闪烁计数器、正比计数器和半导体探测器等。前二者用于波长色散型仪器，后者

表11-3 某些光电倍增管的主要性能[10]

型号	外形		光阴极		倍增极		放大倍数	光谱响应/nm	暗电流 I/A	最大总电压 E/V
	直径/mm	长度/mm	材料	灵敏度/(μA·lm⁻¹)	材料	结构型式				
国产 GDB 44F	52	125	Sb-Cs	50	Sb-Cs	10级百叶窗式	10^8	400±20	2×10^{-8}	2000
GDB 44D	51	125	Sb-Cs	30	Sb-Cs	10级百叶窗式	1.5×10^5	400±20	10^{-8}	1600
GDB 23P	28	120	Sb-Cs	50	Sb-Cs, Cu-Be	11级盒式	$10^6\sim10^7$	400±20	3×10^{-9}	1050
GDB 51F	51	125	K-Sb-Cs	30	K-Sb-Cs, Ag-Mg	9级百叶窗式	$\approx10^7$	400±20	1×10^{-10}	1050
法国、荷兰 50AVP	40		Sb-Cs	60	AgMgOCs	11级直线聚焦	2.5×10^7	420		1800
170AVP	40		Sb-Cs	60		10级直线聚焦	2.1×10^7	420		1800
150CVP	40	—	—	60	—	—	2.1×10^7	—	—	1800
XP1010	40	125	—	60	—	10级直线聚焦	2.1×10^7	—	—	1800
美国 RCA 1P21	30	79		40	Cs_3-Sb	9级环形聚焦	2×10^6	440±50	5×10^{-9}	1250
1P28	30	79		40	Cs_3-Sb	9级环形聚焦	1.25×10^6	440±50	1×10^{-7}	1250
6199	39	57	Cs-O-Sb	45	[Sb-Cs_3]-Cs	10级环形聚焦	6×10^5	440±50		1250
2020	51	124	Cs-O-Sb	50	[Sb-Cs_3]-Cs	10级环形聚焦	5.6×10^5	480±50	-	1250
美国 Du Mont 6291	38	102	Sb-Cs	60	Ag-Mg	10级盒式	5×10^5	440±50	—	2100
6467	22	102	Sb-Cs	60	Ag-Mg	10级盒式	2×10^6	440±50	5×10^{-5}	1800
7064	—		Cs-O-Sb	45~60	Sb-Cs	10级盒式	5×10^6	325~613	5×10^{-7}	1800
K1102	38	108	—	60	—	10级盒式	5×10^5	440±50	—	—
苏联 ФЭУ-35	34	110	Cs-O-Sb	30		9级盒式	4×10^5	350~600	8×10^{-7}	1700
ФЭУ-2M	34	130	Sb-Cs	30		11级直线聚焦	10^6		10^{-7}	1500
英国 EMI 9514B	51		Sb-Cs	50	Sb-Cs	13级纵向非聚焦式	1.1×10^8	320~650	3×10^{-8}	2500
9514S	51		Sb-Cs	50	Sb-Cs	13级纵向非聚焦式	1.3×10^8	290~700	1×10^{-8}	2500
9524B	28.5	—	Sb-Cs	50	Sb-Cs	11级盒式	1.1×10^7	320~650	1×10^{-7}	1760

用于能量色散型仪器。

1. 闪烁计数器

闪烁计数器由闪烁晶体和光电倍增管组成。闪烁晶体通常是用0.5%铊激活的碘化钠单晶，晶片外包有一层铝片，作为可见光的反射镜，光电倍增管由光敏阴极、阳级和一组倍增极组成。适用于闪烁计数器的部分光电倍增管的主要性能见表11-3。闪烁计数器主要用于测定短波X射线，它即可单独使用，也可与正比计数器串联使用。

2. 正比计数器

正比计数器有封闭式和气流式之分，二者都是由金属圆筒、金属丝和填充气体组成。金属圆筒为阴极，金属丝为阳极，填充气体由探测气体和淬灭气体组成。不同之处在于前者的填充气体是密封的，后者是流动的。正比计数器的种类很多，从超长波X射线的探测到较短波段X射线的探测，已经形成一完整系列，可供选用。

3. 半导体探测器

半导体探测器是一块渗有Li的Ge或Si半导体。在能量色散谱仪中，常用的是Si (Li) 探测器，Si (Li) 探测器的最大优点是有很高的探测效率和能量分辨本领，以及很宽的能量探测范围。Si (Li) 探测器近来有两个较大进展[1]，一是成功地引入了Pettier冷却器，二是采用了“量子”窗。例如用0.5μm聚合物的量子窗，最近又用0.25μm含硼90%以上无定型物构成的超量子窗[14]代替Be窗，使EDXRF可测Na至B等超轻元素[15]。

最近又推出了几种新型探测器，其中有超导隧道二极管[16]，电荷偶合装置 (CCD)[17]，成象板[18]，Nb-AlO_x-Nb超道隧道连接探测器[19]等。CCD探测器近年来发展很快，已成为X射线区可用的探测器。Lumb[20]和Clarke[21]总结了CCD探测器的特性。Varidel等[22]报道了CCD用作低能X射线探测器的技术前景。成象板[23]是一种软塑料板涂以光激磷光体和有机粘结剂，X射线照射后，可贮存一部分X射线能量。成象板检测量子效率高，噪音低，便於小角度散射的时间分辨测量。

在过去几年中，HgI_2探测器也有了较快发展，几乎有可能代替Si (Li) 探测器。Leyden等[3]讨论了室温下HgI_2探测器在能量色散谱仪中的一些应用。HgI_2探测器在空间技术、医学图象及便携式仪器上已获成功应用。

表11-4为几种常用探测器的性能比较。

表11-4 常用探测器的性能比较[11]

探测器	闪烁计数器	盖革计数器	短波封闭正比计数器	长波封闭正比计数器	流气式正比计数器	Si (Li) 半导体探测器
窗材和窗片厚度	200μmBe 10μmAl	200μmBe 2.5mg·cm^{-2} 云母	200μmBe 2.5mg·cm^{-2} 云母	25μmBe 6μm Al	(0.5～6)μm喷Al聚酯薄膜、0.1μm火棉胶、聚丙烯或聚乙烯醇缩甲醛薄膜(镍网支撑)	(7～25) μm Be
适用波长范围 λ/nm	0.01～0.3	0.03～0.4	0.03～0.4	0.1～1.0	0.1 ～10.0	0.01～1.0
输出脉冲幅度 V	$\approx 5\times10^{-2}$	≈1	$\approx 10^{-2}$	$10^{-2}\sim10^{-3}$	$10^{-2}\sim10^{-3}$	$10^{-5}\sim10^{-4}$
死时间 $t/\mu s$	≈0.1	≈200	≈0.2	≈0.2	≈0.2	<0.1
允许最大计数率（计数·$秒^{-1}$）	$\approx 10^{6}$	$\leqslant 10^{3}\sim10^{4}$	$\approx 10^{5}$	$\approx 10^{5}$	$\approx 10^{5}$	$>10^{6}$
本底（计数·$秒^{-1}$）	≈10	≈1	≈0.5	≈0.5	≈0.2	—
寿命（总计数）	较短	$\sim10^{9}$	$\sim10^{9}$	$\sim10^{9}$	无限	无限
能量分辨本领	较差	无	较好	较好	较好	最佳

四、记录系统

记录系统主要由放大器、脉冲高度分析器及读示部分组成。

放大器的作用是将来自探测器的脉冲电压信号放大到（5～100）V的脉冲高度，以便驱动脉冲高度分析器进行工作。脉冲高度分析器的作用是甄别脉冲信号和测定脉冲高度分布。读示部分的作用是记录、显示谱线强度及脉冲数，并记录脉冲高度分布曲线。曲线上每个峰所对应的脉冲高度是X射线光子能量的量度，是定性分析的依据；每个峰的峰高是X射线光子数目的量度，是定量分析的依据。

第二节　常用X射线光谱仪

一、X射线光谱仪的分类

按操作方式可分为手控、半自动和自动X射线光谱仪，而自动X射线光谱仪又可分为顺序式和同时式两种。

按分析方式可分为扫描式、多道式和流程式三种。扫描式是样品固定，依次分析其中每种元素；多道式是样品固定，同时分析其中所有元素；流程式是以顺序或同时式反复分析流动的试样。

按激发源可分为X射线管、电子枪、放射性同位素、质子及其他离子源X射线光谱仪。

按光学系统可分为波长色散和能量色散X射线光谱仪。

二、常用X射线光谱仪简介

（1）顺序式自动X射线光谱仪　顺序式自动X射线光谱仪实际上是一种自动单道光谱仪。仪器可依编制的程序，按两种顺序方式操作。一是试样顺序方式（常用型），即在测量了一个样品中全部分析元素后，再测量下一个样品；另一是元素顺序方式，即测量所有试样的同一元素后，再测量各个试样中的下一个元素。另外仪器还按程序自动地选择元件和适合于每条分析线的最佳分析条件，因而大大加速了日常的分析工作。

（2）同时式自动X射线光谱仪　实际上是由许多单道光谱仪构成。每个通道有自己的准直器、晶体、探测器、计数定标或积分器，但样品和读数显示系统是公用的。每个通道的元件可按特定元素的最佳条件进行选择，能同时分析试样中的所有元素，节省分析时间和降低成本。同时式光谱仪适用于分析大量的同类样品，尤其适用于生产控制分析。

（3）能量色散多道X射线光谱仪　包括高功率或低功率X射线管、二次发射体及放射性同位素、电子、质子或其他离子激发源、样品展示系统、Si（Li）探测器、多道分析器、计算机和记忆单元、打印显示单元等。仪器可自动按程序把每个试样送到分析位置，累积能谱，处理数据，打印结果。这种仪器用处很广，可用于测定Na以上的所有元素，分析方便迅速。

（4）便携式X射线荧光光谱仪　是一种轻便型X射线荧光光谱仪，由两个单元组成，用电缆相连结，装有30kV（1～4）mA恒电位电源。X射线单元包括X光管、样品室、测角仪、探测器和计数率计等。另外还设有定标-定时器单元及用于固体、液体、粉末分析的各种样品架。由于该仪器备有可移动的发电机，所以特别适用于地质和探矿现场分析。

（5）过程控制X射线光谱仪　是为连续流水线设计的。分析生产过程中某些阶段产品、副产品、残渣、废料以及其他能反映生产过程情况的材料，实现无人监视的自动操作，其最

终目的是用输出的信号自动控制生产过程。尽管目前已有大量过程控制X射线光谱仪在使用，但这一领域仍处于发展过程的早期阶段。

（6）超长波X射线光谱仪 所谓超长波是指（1.5～15）nm的波长范围，其短波限位于标准X射线光谱仪的长波限。超长波X射线光谱仪包括特殊的X光管电源、X光管、分析晶体和探测器。特别适用于极薄表层的分析，尤其适用于化学状态和电子价带结构的研究。

（7）质子诱导X射线发射光谱仪 由质子加速器、准直器和Si（Li）探测器等组成。从加速器出来的快质子，经准直后，变成均匀平行的质子束打到样品上击出K层或L层电子，产生特征X射线，用Si（Li）探测器检测。通过样品的质子束，用法拉第杯收集。现在该仪器不但用来分析环保、生物和医药样品中的微量元素，而且已用来分析地质样品中原子序数大于20的元素。

（8）辐射源X荧光光谱仪 由辐射源、过滤片和探测器等组成。辐射源放射出来的粒子或γ射线，打到试样上，一定比例的射线为元素所吸收，发射出该元素的特征X射线，经过过滤片，将不需要的X射线除去，待测元素的特征X射线进入探测器，产生电脉冲，经放大，用定标器进行测量。辐射源X荧光光谱仪具有价廉、轻便、快速、稳定、激发选择性高、操作简便等优点。

随着微处理机和小型计算机的广泛使用，X射线光谱仪得到了迅速发展，波长色散谱仪已广泛采用，能量色散谱仪也进入了一个新的研究和应用高潮。此外，全反射X荧光光谱仪[24,25]、偏振X荧光光谱仪[26]、高真空X荧光光谱仪[27]等也引起了人们的重视。

参 考 文 献

1 Gilfrich J V. X-Ray Spectrom, 1990; 19(2): 45
2 Bacon Ellis A T, Williams T G. J Anal At Spectrom, 1990; 5(7): 258R
3 Leyden D E, Harding A R, Goldbach K. Adv X-Ray Anal, 1984; 27: 527
4 Kikkert J N, de Koning J J. Adv X-Ray Anal, 1985; 28: 107
5 De Koning J J, Volbert B. Book of Abstracts of 24 th Coll. Spectrosc Int. Garnisch-Partenkirchen, FRG, 1985; 4: 782
6 Witmer A W et al. Spectrochimica Acta, 1979; 34B(11/12): 415
7 Wobrauschek P, Kregsamer P, Streli C et al. X-Ray Spectrom, 1991; 20(1): 23
8 Huang T C, Fung A, White R L. X-Ray Spectrom, 1989; 18(2): 53
9 Takemura M, Ohmori H. Adv X-Ray Anal, 1989; 32: 185
10 Charbonnier M, Romand M, Grubis B. X-Ray Spectrom, 1988; 17(4): 149
11 谢忠信，赵宗铃，张玉斌等编著. X射线光谱分析. 北京：科学出版社，1982: 146
12 杭州大学化学系分析化学教研室编. 分析化学手册，第三分册. 北京：化学工业出版社，1983: 948
13 E. P. 伯廷编，李瑞城，鲍永夫，吴效林译. X射线光谱分析的原理和应用. 北京：国防工业出版社，1983: 555
14 Grieken R E Van, Markowicz A A, Veny p. X-Ray Spectrom, 1991; 20(6): 271
15 Bogert J R. Adv X-Ray Anal, 1988; 31: 449
16 Gilfrich J V. Adv X Ray Anal, 1987; 30: 35
17 Sweedler J V et al. Anal Chem, 1988; 60(4): 282A
18 Torok S B, Grieken R E Van. Anal Chem, 1992; 64(12): 180R
19 Kurakado R et al. Jap J Appl Phys, 1989; 28: L459
20 Lumb D H. Nucl Instrum Meth Phys Res, 1990; A290: 559
21 Clarke R. Nucl Instrum Meth Phys Res, 1990; A291: 117
22 Varidel D et al. Nucl Instrum Meth Phys Res, 1990; A292: 147
23 Amemiya Y. Synchrotron Radiation News, 1990; 3: 21
24 Wobrauschek P et al. Spectrochimica Acta, 1980; 35B(10): 607
25 Knoth J et al. F Z fur Anal Chem, 1980; 301(1): 7
26 Wobrauschek P et al. X-Ray Spectrometry, 1978; 7(4): 241
27 Kimitaka Sato et al. X Ray Spectrometry, 1979; 8(2): 68

第十二章　X射线光谱分析法及其应用

第一节　常用X射线光谱分析方法

一、X射线荧光分析法（XRF）

用初级X射线激发原子内层电子所产生的次级X射线叫荧光X射线。基于测量荧光X射线的波长及强度以进行定性和定量分析的方法，称为X射线荧光分析法。

X射线荧光分析是对各种各样材料进行元素测定的一种现代化的通用分析方法，根据不同应用要求，其分析浓度范围可从0.1$\mu g \cdot g^{-1}$高至100%。XRF分析的特点是测定元素范围广、测定精度高，重现性好，样品制备简单，分析速度快。

现代XRF已发展成许多分支，除常规的波长色散XRF（WDXRF）和能量色散XRF（EDXRF）外，尚有全反射XRF（TXRF）、同步辐射XRF（SXRF）、偏振XRF、粒子激发XRF（PIXE）等。

1. 常规X荧光分析法

常规XRF包括WDXRF和EDXRF，其分析机理可概述如下：以X光管作为初级射线源，样品中元素的内部电子被高强度的X射线激发，产生代表各元素特征的X荧光。这种包含多种波长的X荧光经分光后成为各条独立的光谱线，只要测出这些谱线的波长，即可进行定性分析。测得谱线的强度，并与已知的标样强度进行比较，即可进行定量分析。

WDXRF和EDXRF在定性、定量分析的原理、制样技术及应用等许多方面有共同之处，不同之点在于WDXRF是用分析晶体作为分光装置，按照波长顺序进行分离，而EDXRF是以脉冲高度分析器作为分光装置，按照光子能量的大小进行分离。WDXRF是目前应用得最广泛的一种分析方法。

2. 全反射X荧光分析法

1971年Yoneda等[1]首先将全反射现象用于XRF分析，1975年Wobrauschek等[2]设计了第一台TXRF装置，10年后开始用于日常分析，并有商品化TXRF仪器问世。

TXRF的激发与XRF不同，XRF通常是以入射角大约45°的初级X射线激发样品，而TXRF是以入射角<0.1°的初级X射线激发样品。样品置于载体上，初级X射线以全反射经过载体表面，激发出来的X射线荧光，用Si(Li)探测器检测。

据文献[3]推导，全反射的临界角

$$\phi_c = 2.3 \times 10^5 \left(\frac{Z\rho}{A}\right)^{1/2} \lambda \tag{12-1}$$

式中，Z、A和ρ分别是反射物质的原子序数、原子量和密度；λ是反射X射线的波长。由此可见，全反射的临界角ϕ_c与反射体的性质和X射线的波长有关。

全反射的背景主要是初级X射线在反射体上的散射引起，背景的强度I_B正比于$\sin\phi(1-R)$[4]，即

$$I_B \propto \sin\phi(1-R) \tag{12-2}$$

式中 R 为反射率，ϕ 值大时，背景遵从正弦定律，ϕ 值很小时，R 值很高，背景就按 $(1-R)$ 急剧下降。在临界角以下，R 接近 100%，I_B 接近于零，因此全反射背景很低。样品置于反射体上，入射和反射的初级 X 射线都要激发样品，因而谱线的强度 I_L 取决于

$$I_L \propto (1+R) \tag{12-3}$$

故在全反射条件下，谱线强度几乎增加一倍。峰背比大大提高，检出限可以改进 $I_L/\sqrt{I_B}$ 倍，相当于降低 3 个数量级[4]。

用 TXRF 分析样品时，样品的临界厚度 t 可按下式计算。

$$t \leqslant \frac{0.05}{\mu_m \rho} \tag{12-4}$$

式中，μ_m 和 ρ 分别为样品的质量吸收系数和密度。

TXRF 特别适用于痕量和超痕量元素分析。用 TXRF 分析雨水、海水、河水、矿物油、血浆、高纯金属和超纯试剂等样品中的痕量元素，都取得了满意的结果。TXRF 技术也特别适于表面和表层分析，不但可以分析载体上薄层样品的成分、厚度和密度，而且还可分析载体表面的沾污和表面内的杂质。这在半导体工业中是很有用的。

3. 同步辐射 X 荧光分析

同步辐射是由电子储存环中作相对圆周运动的电子发射出来的一种光辐射，其强度要比通常 X 射线管的强度高好几个数量级。用同步辐射源代替 X 射线管，作为 XRF 的一种新光源，可提高分析方法的灵敏度和准确度。采用同步辐射源（SR）的 XRF 称为 SXRF。SR 由于强度高，准直性好，背景低等独特的优点，引起分析家的极大兴趣。Jaklevic 等[5]对 SR 用于 EDXRF 进行了评述。陈远盘评述了 SR 在 XRF 中的应用[6]及 SXRF[7]的新进展，柴之芳[8]和李学军等[9]分别概述了 SXRF 的特点，实验装置，应用，国内外现状及展望。应用方面的论文涉及环保、地质、生命科学和半导体工业等领域。

4. 偏振 X 射线荧光分析

1974 年，Dzubag 等[10]提出用偏振 X 射线激发样品，可以显著地降低背景，提高峰背比，并取得美国专利（No，3944822）。同时，Howell 等[11]和 Kaufman 等[12]研制了各种形式的偏振器，用于 X 射线光谱分析。Wobrauschek 等[13]用 Cr 阳极和 Ta 单晶（002）面作偏振器，Ca 的检出限达到 1ng。

分析晶体可作单色器，同时也可作偏振器。要把晶体作为一个偏振的单色器，必须满足布拉格定律，即 $n\lambda=2d\sin\theta$，同时又满足偏振条件，即 $\theta=45°$。因此

$$n\lambda=\sqrt{2}d \tag{12-5}$$

在 Wobrauschek 等[13]设计的偏振 X 荧光光谱装置中，X 射线源和作偏振器的单晶是可以更换的。样品置于样品支座上，探测器必须与激发样品的偏振 X 射线方向垂直，这样才没有散射辐射进入到探测器中，只探测样品的特征辐射。分析低 Z 元素用 si(Li)探测器，分析高 Z 元素用 Ge(Li)探测器。

偏振 XRF 近来在应用上有所进展，Hochel 等[14]用偏振 XRF 分析了岩石和土壤中的痕量元素，36 个元素的检出限，除 Ti 是 $15\mu g \cdot g^{-1}$外，其他元素都在 $(0.3\sim3)\ \mu g \cdot g^{-1}$范围内。

5. 粒子激发 X 射线发射分析

由粒子（如质子、α 粒子等）激发的 X 射线发射分析自 70 年代出现以来已发展为一门相当成熟的核分析技术。近年来最为注目的发展是经良好聚焦的带电粒子束可提供优于 1μm 的分辨率，加上 PIXE 良好的检出限，可使检出的元素降至 $10^{-17}g \cdot \mu m^2$。

PIXE-XRF 是一种用粒子轰击原级靶，产生近乎单色 X 射线的 XRF 分析方法。与传统 PIXE 相比有两个优点，其一是通过选择合适的原级靶材可消除样品中主量元素所引起的谱线干扰，其二是可大大减轻对样品的损伤。Zeng Xianghou 等[15]进行了 PIXE-XRF 透射靶的几何形状等的相关研究，初步实验表明，利用透射靶比用反射法获得的特征 X 光产额高两个数量级，使薄、厚样的检出限达到亚 10^{-6}。朱节清等[16]介绍了 90 年代在上海原子核所建成的长焦距核探针上，进行生命科学、材料科学和地球科学方面一些试样的应用情况。近年来，PIXE 在环保和生命科学领域的应用有了较快进展。

二、X 射线吸收分析法

以测量透过样品的 X 射线强度为基础而建立起来的分析方法称为 X 射线吸收法，其定量分析的基础是吸收定律。该法主要用于分析轻基体中的重元素。按其吸收原理和使用的照射源不同，可分为多色 X 射线吸收分析法，单色 X 射线吸收分析法和吸收限分析法。

1. 多色 X 射线吸收分析法

多色 X 射线吸收分析法是利用 X 射线管发射出来的初级 X 射线束（包括所有波长的连续光谱与特征光谱）直接透过厚度相等、组成相似的试样和标样，根据其透射束强度随分析元素的含量发生相反的变化，而对试样中的分析元素进行定量测定的。

由吸收定律和质量吸收系数的叠加原理可得

$$\ln\frac{I_0}{I}=[c_A\mu_m^A+(1-c_A)\mu_m^M]\rho L \tag{12-6}$$

由此可得分析元素 A 的含量为

$$c_A=\frac{\ln(I_0/I)-\mu_m^M\rho L}{(\mu_m^A-\mu_m^M)\rho L} \tag{12-7}$$

或

$$c_A=\frac{a}{\rho}\lg(I_0/I)-b \tag{12-8}$$

其中

$$a=\frac{2.303}{(\mu_m^A/\mu_m^M)L} \tag{12-9}$$

$$b=\frac{1}{(\mu_m^A/\mu_m^M)-1} \tag{12-10}$$

式中，c_A 为分析元素的含量（质量分数，%）；$(1-c_A)$ 为样品中基体元素的含量，%；I_0 为初级入射束的强度；I 为透射束的强度；μ_m^A 为分析元素 A 对初级入射束的质量吸收系数；μ_m^M 为样品中除分析元素外其余各元素（总称基体元素 M）对初级入射束的质量吸收系数；ρ 为样品密度；L 为样品厚度。

式（12-7）或式（12-8）是应用本法进行定量测定时的基本关系式。

2. 单色 X 射线吸收分析法

单色 X 射线吸收分析法的原理与多色 X 射线吸收法相同，不同的是，单色 X 射线吸收法采用的是单一波长的 X 射线束照射样品，与化学分析中的分光光度法极为相似。

获得单色辐射的方法一般有三种：①和多色吸收法一样，初级线束直接通过样品，但在初级线束中放一滤光片，令一条主要靶线通过，而衰减其他靶线和连续谱；②初级线束直接通过样品，但是调整测角仪，只对选定波长进行衍射和探测；③初级线束直接照射到二次靶

上，该二次靶可产生一波长适当的强特征线。

为了提高灵敏度和专用性，选用的波长应刚好短于分析元素的吸收边。与多色X射线吸收法相比，本法具有较大的灵活性，更为简便，可靠。

3. 吸收限分析法

如以初级多色束透过厚度 L 和密度 ρ 的均匀薄层样品，然后经过晶体分析器分解成光谱，则在分析元素的吸收边两侧，可观察到透射束强度的陡变。在一定的实验条件下，由该吸收边两侧测出的强度比，取决于分析元素的含量，根据这一原理制定出的分析元素定量方法，即为吸收限分析法。

根据吸收定律可得吸收限分析法的基本关系式：

$$c_A = \frac{\lg(I_{q2}/I_{q1})}{K_A \rho L} \tag{12-11}$$

其中
$$K_A = 0.434\left[(\mu_m)_{q1}^{A} - (\mu_m)_{q2}^{A}\right] \tag{12-12}$$

式中，c_A 为分析元素的含量；I_{q1} 为在吸收边短波测 λ_{q1} 的透射束强度；I_{q2} 为在吸收边长波侧 λ_{q2} 的透射束强度；$(\mu_m)_{q1}^{A}$、$(\mu_m)_{q2}^{A}$ 为分析元素在 λ_{q1}、λ_{q2} 处的质量吸收系数。

4. X射线吸收分析法的应用

(1) 元素的测定　主要适用于在比较轻的基体中测定原子序数比较高的元素。例如，测定汽油和碳氢化合物中的重金属添加物，以及测定金属和矿石加工过程渗出物中的重元素。因此，本法在石油工业和原子能工业部门中得到了较多的应用。

(2) 薄膜和镀层的厚度测量　利用X射线吸收法测定金属薄膜或薄片的厚度，以及镀层或涂层的厚度。是很早就已经发展起来的一项重要用途。厚度的测量，常用透射-吸收法。此法所用的入射线，可以是多色束，也可以是单色束。根据吸收定律，其透射束强度为

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho L} \tag{12-13}$$

式中，μ_m 为金属薄片或涂层等对入射束的质量吸收系数；ρ 为金属薄片或涂层的密度；L 为金属薄片或涂层的厚度；I_0 为入射束强度。

在一定的仪器和样品条件下，I_0 与 $\mu_m \rho$ 均为常数。因此，在实际测量厚度时，可以直接利用标样制作 I-L 关系曲线，或制作 $\ln \frac{I_0}{I} - L$ 曲线以备用。

(3) 固体的疏松度测定　X射线吸收法用于测定固体的疏松度 P，可按下式进行计算：

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - \frac{V}{V_0} = 1 - \frac{\rho L}{\rho_0 L_0} \tag{12-14}$$

同时，由 $2.303\lg(I_0/I) = \mu_m \rho L$ 可得

$$P = 1 - \frac{2.303\lg(I_0/I)}{\mu_m \rho_0 L_0} \tag{12-15}$$

式中，I_0 和 I 分别为入射束和透射束的强度；μ_m 为质量吸收系数；V，ρ，和 L 分别为致密材料的真实体积、密度和厚度，加有下标“0”者代表原疏松材料的表观量。根据式 (12-15)，如果材料的 μ_m 为已知，只要测出 I_0、I 和 $\rho_0 L_0$ 值，则此材料的疏松度便可计算出来；如果 μ_m 为未知量，也可以与已知组成和厚度的样品比较，算出未知样品的疏松度。应用此法可以测定木材、纸张产品、石棉产品、陶瓷、玻璃、塑料以及各种填料等的疏松度。

此外，X射线吸收分析法还可用于研究金属间的扩散，观察高温、高压下液体密度的变化和气孔的存在，动态过程的控制，纺织品或类似产品中重元素和填料的鉴定等。

三、X 射线散射法

在 X 射线光谱分析中，散射线是背景的主要来源，它限制分析灵敏度，并可引起谱线干扰。但是近来发现，散射 X 射线还是有一定的应用价值。

1. X 射线散射浊度法

Ziegler 等[17,18]建立了一种以相干散射为基础的方法，用来测定轻基体中的重元素，这种方法称为 X 射线散射浊度法。用高能（80～150kV）多色 X 射线束照射样品溶液，在适当角度测量相干散射线的强度。为了使相干散射线的强度远远超过非相干散射线的强度，可以滤掉初级线束中的长波部分，在大 2θ 角（$2\theta\approx140°$）处测量散射线，并使用鉴别器，使之只能通过初级线束中最大光子能量附近射线引起的探测器输出脉冲。因为相干和非相干散射线强度分别正比于 Z^3 和 Z，所以散射线的强度主要取决于重元素的含量。

已经采用这种方法测量高浓度铝和不锈钢样品溶液中体积浓度为（1～10）$g\cdot L^{-1}$的铀。对试样和两个标样测出散射线强度，该试样的铀浓度介于两个标样的铀浓度之间。

$$c_x=c_1+(c_2+c_1)\frac{I_x-I_1}{I_2-I_1} \qquad (12\text{-}16)$$

式中，c 是浓度；I 是选定角度的散射线强度；下标 1 和 2 指标样，x 指试样。

2. 相干与非相干散射比例法

Dwiggins[19,20]采用相干与非相干散射比例法，测定了液态碳氢化合物中的碳。测出试样和一系列标样对 X 射线管靶线的相干与非相干散射强度之比值 R，由标样作出 R 随浓度（c/%）变化的校准曲线，由校准曲线找出分析浓度。Toussaint 等[21]推广了这一方法，使之适用于固态碳氢化合物样品。

四、扫描 X 射线显微法

扫描 X 射线显微法即小样品的 X 射线照相和放大方法，主要有接触 X 射线显微照相法、扫描 X 射线发射显微法、扫描 X 射线吸收显微法等。

1. 接触 X 射线显微照相法

接触 X 射线显微照相法是把待测材料的均匀薄片贴到细颗粒照相板的乳胶面上，用 X 射线照射，则乳胶面就记录下穿过样品的 X 射线强度分布花样，把这种 X 射线接触显微照片放大 200 倍，就能揭示出样品的微孔、裂纹、夹杂物、偏析，不均匀等，揭示出选定元素在样品面上的分布。

2. 扫描 X 射线发射显微法

扫描 X 射线发射显微法是用很小的电子束或 X 射线束（微米级）扫描样品，它们与阴极射线管上的扫描是同步的。用波长色散谱仪或能量色散谱仪把样品上每一小面元瞬时发射的 X 射线色散开，并进行探测。用所选 X 射线瞬时输出强度来调制阴极射线管屏上的亮度，屏上每个面元的亮度与样品上相应面元发出的所选 X 射线强度成正比，因此可以显示任一所选元素的分布。

可以在样品的正面测量发射线，对于透明样明，也可以在背面测量发射线。适当地倾斜样品，把样品两种不同取向的显示图像拍摄下来，就可以得到立体 X 射线显微照片。若用步进扫描代替连续扫描，则强度可以逐点标定，这样就可以增强图象和进行定量分析。

3. 扫描 X 射线吸收显微法

用具有X射线探针的扫描X射线显微镜观测透明的薄样品，可以测出样品每个小面元上透过的X射线的瞬时强度，还可以用该瞬时强度调制显像管束流。如果不用脉冲高度选择器，则只能显示出密度分布或平均原子序数分布的图像；若采用单色扫描X射线或者是多色扫描X射线加脉冲高度选择器，需用两种不同的单色X射线，在样品的同一个区域上拍摄两种X射线显微照片，这两种X射线波长分别位于该元素吸收边的两侧。在阴极显示屏上对应于长波和短波的区域分别为亮区和暗区，两种显示图像的差异是由选定元素引起的，因而可描绘出某一元素的分布。

五、X射线外观电位光谱法

X射线外观电位光谱法是一种能量色散X射线光谱法。Park等[22]在研究固体表面原子的核心电子结合能时，提出了这种方法。

本法是以电子激发的X射线总强度对轰击电子电位作图，在“外观电位”(即特征X射线激发电位）处，曲线出现陡然变化。所发射的特征X射线强度与发射元素的表面浓度和处于未充满电子状态的密集程度有关。

X射线外观电位谱仪的样品靶，发射热电子的钨灯丝和探测器都密封在真空室中，靶到探测器的距离约为15cm。在靶上施加一直流电压，当电源在一个线性“斜陡”发生器上扫过时，电压在（0～2）kV内呈线性变化。灯丝发出热电子，热电子受到加速，打到靶子上激发出X射线，部分X射线被探测器截获。用电子学微分方法，可以使X射线强度随靶电位变化的陡变部分得到进一步加强。把一个由（50～2000）Hz振荡器产生的调制直流电源迭加到靶电位上，就得到测量强度对靶电位的一阶导数。用锁定放大器同步地测量强度的起伏。靶电压的扫描可以是步进的或连续的。强度对电子加速电压的一阶导数 dI/dV 用 x-y 记录仪记录，就可得到在激发电位范围内的X射线外观电位光谱图。

外观电位光谱法主要适合研究表面情况，包括成分、核心电子结合能、化学位移、频带结构和污染作用等的研究。

六、电子探针分析法

电子探针分析法是用一束聚焦得很细的加速到（5～30）kV的电子束，轰击用显微镜选定的待分析试样上某个点［一般直径为（1～5）μm］，利用试样受到轰击时发射的特征X射线的波长和强度，来确定分析区域中的化学组成。

电子探针是对材料小区域内的化学成分进行分析的仪器，它是由电子光学系统、样品室、光学及电子光学观察系统、谱仪及接收记录系统等部分组成。电子光学系统的作用是产生具有一定能量、强度和直径的电子束，并将这个电子束送到试样表面。它包括两部分，一部分是产生高速电子的电子枪，另一部分则是将高速电子加以聚焦使之在样品表面形成一个很小焦斑的电磁透镜组和与之相连接的电路系统。光学观察系统就是一台光学显微镜，其作用是使操作者可以找到要分析的区域，并把分析结果与观察到的显微组织对应起来。电子光学观察系统是由扫描线圈、阴极射线管、信号甄别器、接收器及放大器等部分组成，其作用是对试样进行显微观察，并显示分析结果。它是利用二次电子、背散射电子、吸收电子、透射电子或者X射线形成图像，获得有关试样表面的形貌，试样表面的电位分布，以及成分分布等信息。谱仪及接收系统的作用与普通X射线光谱仪相同。

电子探针为科学工作者提供了分析微区化学成分的手段，其主要应用有：

①分析多相合金、陶瓷、矿物中单个晶粒；

②分析同种材料中的微观凝结物、夹杂物、偏析物等；

③分析晶界；

④分析涂层、镀层结合面和腐蚀面；

⑤画出金属-金属界面、金属-陶瓷界面、扩散偶、扩散带、多相晶界处的浓度梯度；

⑥鉴定微观均匀性；

⑦画出多相合金、陶瓷、矿物等材料中各种元素的分布；

⑧分析气体和液体中过滤出的细小颗粒；

⑨测定生物材料中固有元素和外来元素及其分布；

⑩分析小型半导体装置或小零件上的特定区域；

⑪测定薄膜的成分和厚度；

⑫周期表中从 Be 到 U 的元素都可用电子探针分析，而且一般都能用统一的分析程序来进行，因此非常便于分析操作的自动化。

用电子探针进行分析，对试样的物理和化学状态均无损坏。因此，还常用于分析贵重、稀有试样，以及用于生产过程的中间检验。

电子探针是测量微观区域内成分及成分分布的不可多得的仪器之一，目前在冶金、陶瓷、矿物学、地质、生物、医学及材料科学等领域都获得了十分广泛的应用。

第二节　X 射线光谱分析法的应用

表 12-1　X 射线光谱分析法的应用

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
抗酸片剂	Al	能量色散 XRF	—	—	1.6	100.6	1
饮用水	As	萃取 XRF	0.56μg·L⁻¹	—	—	—	2
水	As(Ⅲ), As(V)	巯基纸分离富集-XRF	0.15μg	—	—	—	3
地质样品	As	离子交换富集-XRF	0.10μg·g⁻¹	—	—	—	4
活性炭	Au	放射活化同位素 XRF	30g·t⁻¹	≤200μg·g⁻¹	1	—	5
地质样品	Au	萃取 XRF	0.04μg	—	—	—	6
天然水、废水	Au	巯基纸分离富集-XRF	0.15μg	—	—	—	7
矿石	Au	活性炭吸附-能量色散 XRF	0.045μg·g⁻¹	—	2.7	98±8	8
矿石	Au	巯基泡塑富集-XRF	0.15μg	(0～80)μg	<3.64	93～104	9
硼磷硅酸盐玻璃薄膜	B	XRF	0.04%	—	—	—	10
岩石、土壤	Br	XRF	0.05μg	—	—	—	11

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
球墨铸铁	Ca	XRF	—	(10～40)μg·g^{-1}	0.01～2.8	—	12
河水、雨水、海水、自来水	Cl	溴化银共沉淀-XRF	0.04mg	(0.1～1.0)mg·L^{-1}	0.72～6.7	—	13
聚氨酯泡沫	Co	XRF	0.05μg·g^{-1}	(0.25～2.5)μg·g^{-1}	—	—	14
地下水	Cr(Ⅵ)	二苄基二硫代氨基甲酸钠沉淀-XRF	0.7μg	≤1μg·ml^{-1}	—	—	15
铜、铅、银合金	Fe	共沉淀-XRF	灵敏度 120CPS·μg^{-1}	(0.1～50)μg	1.1	—	16
铝合金等	Ga	XRF	60ng·ml^{-1}	(0.1～2.3)μg·ml^{-1}	1.5	—	17
—	Ge	聚氨酯泡沫萃取-XRF	7μg	≤350μg	4.0～9.4	—	18
工业废液	Hg	萃取 XRF	3μg	(0.018～83)mg·L^{-1}	≤9.8	—	19
海洋沉积物	Hg	催化动力学-XRF	0.005ng·g^{-1}	(0～2)ng·g^{-1}	—	96～106	20
热电子材料	In	XRF	0.28%	—	0.31～7.45	—	21
饮用水	碘化物	能量色散 XRF	0.45μg	—	—	7(相对误差)	22
海洋沉积物空隙水	Mn	共沉淀-XRF	0.05μg·L^{-1}	10	—	—	23
硅片	Ni	XRF	10^{14}原子·cm^{-2}	(5×10^{11}～1×10^{18})原子·cm^{-2}	—	—	24
氮化硅	O	XRF	—	0.1%～4.3%	2.3	—	25
造纸厂废水	P	能量色散 XRF	0.89mg	—	—	—	26
大气粉尘	Pb	XRF	0.02μg·m^{-3}	—	—	—	27
悬浮空气颗粒	Pb	波长色散 XRF	—	(0.22～22)μg·cm^{-2}	1.82～16.25	91.3～104	28
铝基铂催化剂、废催化剂	Pt	XRF	—	—	0.587	100.7～105.6	29
辉铜矿	Re	XRF	0.3μg	(0.3～1000)μg	—	—	30
燃料油	S	XRF	0.002%	0.002～4	0.03	—	31
煤灰	S	XRF	—	1～30	—	相对误差±10%以内	32
黄铁矿玄武岩	S	XRF	—	—	4.4	9.8(相对误差)	33
土壤	S	XRF	4.5μg·g^{-1}	—	—	—	34
球墨铸铁	Sb	波长色散 XRF	—	≤200mg·kg^{-1}	—	—	35
高纯锌	Sb	XRF	0.1μg	—	—	—	36
生药	Se	能量色散 XRF	0.03μg·g^{-1}	≤5μg·g^{-1}	—	—	37
铝硅和铝硅铜合金	Si	XRF	—	2～13	1.1	—	38

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
含钛矿石、精矿、含硅材料	Sn	XRS	$10\mu g \cdot g^{-1}$	—	10	—	39
岩石、矿物	Th	阴离子交换萃取-XRF	$13\mu g$	—	—	—	40
矿石	Th	阴离子交换树脂膜吸附-XRF	—	$(0\sim2.5)\mu g \cdot ml^{-1}$	1.48~3.38	−1.0~2.0（相对误差）	41
有机金属化合物	U	XRF	—	$(0.2\sim2)mg \cdot ml^{-1}$	<3	—	42
硅酸岩石	Y	沉淀-XRF	$2\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	—	43
岩石	Zr	氢氧化铁共沉淀-XRF	$0.4\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	—	44
铝合金	Nb, Mo, Sn, Ce, Ba, La, Hf, Ta, W, Pb, Th, U, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr	滤纸片薄样法-XRF	依次为 1.0, 1.0, 6.8, 22.3, 22.7, 5.4, 2.0, 5.9, 5.3, 10.1, 2.6, 2.4, 9.3, 3.3, 2.9, 2.9, 16.4, 2.9, 2.9, 2.2, 2.0, 1.3, 1.3, 1.3, 1.0$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	—	—	45
稀土氧化物	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Fe, Ca	XRF	依次为 0.002, 0.002, 0.006, 0.001, 0.003, 0.007, 0.004, 0.004, 0.005, 0.005, 0.003, 0.008, 0.007, 0.005, 0.001, 0.002$mg \cdot ml^{-1}$	—	—	—	46
硅酸盐耐火材料	P_2O_5, MnO	XRF	—	P_2O_5 0.01~0.1 MnO 0.001~0.01	—	—	47
磁泡薄膜	Y, Bi, Ge, Ca, Fe, Si	XRF	—	—	Y 0.28, Bi 1.32, Ca 0.34, Fe 0.34, Ge 0.32, Si 1.43	—	48
—	U, Pu	XRF	U $10\mu g \cdot ml^{-1}$, Pu $50\mu g \cdot ml^{-1}$	U 0.1 ~ 5$mg \cdot ml^{-1}$, Pu0.5 ~ 5 $mg \cdot ml^{-1}$	U1, Pu2		49
化探样品	Nb, Zr, Y, Sr, Rb, Th, Pb, Bi, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, La, Ti, Ba, Ca, K, Si, Al, P, Mg, Na	XRF	—	—	0.1~1.5	0.1~3（相对误差）	50
润滑油	Zn, S, P	薄样 XRF	Zn0.001%, S0.003%, P0.001%	—	Zn 2.7~3.2, S 2.4~3.0, P 2.5~3.6	—	51
废水	Al, Ga	萃取 XRF	Al 0.001%, Ga 0.5$mg \cdot L^{-1}$	—	—	—	52
—	K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Cd, Pb	能量色散 XRF	依次为 578.96, 6.1, 1.9, 2.1, 7.4, 2.5, 3.2, 4.0, 0.9, 7.4, 3.7, 8.2$ng \cdot cm^{-2}$	依次为 50~5000, 100~15000, 0.4~40, 2~200, 30~6000, 0.3~30, 0.5~80, 10~1000, 10~1500, 10~200, 3~300, 5~500, 20~2000$ng \cdot cm^{-2}$	—	—	53

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 c_v/%	回收率 w/%	文献
锌铅矿石	Fe,Zn,Pb	能量色散 XRF	—	依次为 3.52～262、0.52～92，0.05%～5%	Fe 3.6,Zn 6.2，Pb 9.2	—	54
玩具塑料	Sb，Ba，Cr，Cd，Hg，Pb，As	共沉淀 XRF	—	依次为 0～100，0～1000,0～200，0～200,0～200，0～150,0～200μg	Sb 7.1，Ba 11，Cd 1.9，Hg 0.2，Pb 0.2，As 26	相对误差 Sb 5.1，Ba 7.9，Cd 1.4，Hg 1.2，Pb 7.9，As 19.1	55
稀土	La，Ce，Nd，Pr，Sm，Eu，Ga，Y，Th 等	滤纸片法 XRF	(20～60)μg·ml^{-1}	0.02%～25%(La，Ce，Pr，Nd，Sm)；0.005%～1%(Eu,Ga,Y,Th)	-	—	56
生物试样	As,Sb,Se	氢化物发生 XRF	As0.13，Sb0.03，Se0.13μg·g^{-1}	依次为 0.13～20，0.03～20，0.13～20μg·g^{-1}	As 1.4，Sb 9，Se 10	相对误差 As －8.2，Sb 17，Se 9	57
高纯稀土氧化物、混合稀土氧化物	Ce，Y	XRF	Ce0.006%，Y0.002%	0.10%～99.00%	0.08	—	58
油样＋氧化镁	V，Cr，Mn，Fe，Ni，Cu，Zn	能量色散 XRF	依次为 4.2，2.9，2.1，1.9，1.0，1.4，1.0μg·g^{-1}	—	—	—	59
油页岩	V,Co,Ni，Cr，Cu，Zn，Sr,Ba,Rb	XRF	依次为 4.2，3.0，2.6，3.5，2.2，2.4，1.8，9.5，2.8μg·g^{-1}	依次为(14.6～196)，(9.8～78)，(12.8～287)，(9.0～220)，(12.5～395)，(11.4～115)，(8.0～117)μg·g^{-1}	—	—	60
矿物岩石、土壤	Co，Ni，Cu，Pb，Zr 等	萃取离子交换富集-XRF	依次为 0.16，0.15，0.11，0.29，0.21μg·ml^{-1}	—		—	61
黄金饰品	Au，Ag，Cu，Zn	能量色散 XRF	—	—	0.1～0.2	相对误差 0.15%～0.5%	62
铁砂	TFe，MnO，V_2O_5，TiO_2，CaO，SiO_2，Al_2O_3，MgO	XRF	—	依次为(0～40)，(0～10)，(0～20)，(0～30)，(0～30)，(0～40)，(0～20)，(0～10)%	依次为 1.2，1.4，—，—，0.9，0.6，2.1，0.3	—	63
高纯氧化铝	Fe,Na,K	XRF	依次为 0.005%，0.02%，0.01%	—	—	—	64
硅酸盐	S，Na，Mg，Al，Si，P，K，Ca，Ti，Mn，Fe，Ba，Cr，V，Sr，Rb，Cu，Ni，Nb	XRF	依次为 0.004，0.0679，0.031，0.0126，0.191，0.0036，0.0026，0.0045，0.00424，0.0013，0.0038，0.0051，0.0011，0.0006，0.0004，0.00042，0.00051，0.00064，0.0001%	—	—	—	65
粘土、玄武岩等地质样品	Na，Mg，Al，Si，P，K，Ca，Ti，Mn，Fe，Sr，Rb，Ba，Zn	熔片法 XRF	依次为 0.0332，0.046，0.0062，0.01，0.0044，0.01，0.0058，0.003，0.0012，0.0061，0.0005，0.0010，0.0023，0.0005%	0～96%	-	--	56

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
地质样品	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y	化学XRF	(0.021～0.180) μg·ml^{-1}	—	2.72～16.15	89.8～110	67
地质样品(如硅酸盐类岩石)	Nb, Mo, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Hf, Ta, W Pb, Th, U, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr	XRF	依次为 1.0, 1.0, 6.8, 22.3, 22.7, 5.4, 5.4, 2.0, 5.9, 5.3, 10.1, 2.6, 2.4, 9.3, 3.3, 2.9, 2.9, 16.4, 2.9, 2.9, 2.2, 2.0, 1.3, 1.3, 1.3, 1.0μg·g^{-1}	—	—	—	68
地球化学样品	Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Pb, Th	XRF	Ti10, Mn10, V9, Cr7, Co3, Ni2, Cu3, Zn3, Sr3, Y2, Zr2, Nb1, Ba13, La8, Pb4, Th2μg·g^{-1}	依次为(0.01～0.55), (0.01～0.73), (1～30), (10～90), (0.01～0.2), (0.01～10), (0.01～0.6), (0.03～3), (0.01～0.2), (0.96～36)%; (10～300), (1～43), (1～8), (1～8), (1～1500), (10～1000), (10～1100), (4～100), (10～500), (5～500), (30～205), (10～200), (5～700), (1～11)μg·g^{-1}	依次为 4.3, 2.9, 1.9, 0.2, 2.2, 1.1, 1.3, 0.5, 0.5, 0.8, 0.03, 0.03, 0.05, 0.02, 0.02, 0.03, 0.02, 0, 0.02, 0, 0.01, 0.2, 0.1, 0.09	—	69
稀土	Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Lu	共沉淀-XRF	约 0.01μg·g^{-1}	—		95.9～101.2	70
铅锌矿选矿流程样	Pb, Zn, Cu, Fe	滤纸片薄样法-XRF	—	—	Pb 2.55～6.02, Zn 0.83～3.72, Fe 1.28～3.16	—	71
泉水	As, Sb	共沉淀-XRF	As0.3μg, Sb6.1μg	—	—	—	72
岩石、土壤	Pb, Zn, Cu, Mo, Bi, Sn	萃取富集-XRF	依次为 0.14, 0.08, 0.08, 0.04, 0.12, 0.6μg·g^{-1}	—	—	—	73
铬渣	Cr, Fe, Ni, Mn, Zn	XRF	依次为 0.036%, Fe0.039%; 35.33μg·g^{-1}, 498.18μg·g^{-1}, 55.61μg·g^{-1}	依次为(0～0.07), (0～0.1), (0～600), (0～4000), (0～100)μg·g^{-1}	—	—	74
粒状活	Al, S, Cl,	能量色	依次为 3.9				

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
银杏叶	Se，Cu，Zn，Cr，Mn，Fe，Ca	能量色散 XRF	2.5ng	依次为(0.1～2.17)，(2.8～6.9)，(6.1～17.1)，(1.1～6.6)，(74～399)，(15～73)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	95～103	78
稀土氧化物	La_2O_3，GeO_2，Pr_6O_{11}，Nd_2O_3，Sm_2O_3，Eu_2O_3，Gd_2O_3，Tb_4O_7，Tm_2O_3，Dy_2O_3，Yb_2O_3，HD_2O_3，Lu_2O_3，Er_2O_3，Y_2O_3，ThO_2，U_3O_8	XRF	依次为 0.0079，0.064，0.0073，0.0062，0.0083，0.0079，0.0067，0.0064，0.0074，0.0074，0.0083，0.0069，0.0082，0.0075，0.0014，0.0027，0.032%	—	—	—	79
中药胡芦巴	总磷脂	XRF	0.086μg	(1～5)mg	—	—	80
土壤	Fe_2O_3，CaO，K_2O，P，Mn，Cu，Zn	XRF	依次为 16，24，20，4.3，5.9，2.1，2.4$\mu g \cdot g^{-1}$	依次为(1.9～18.84)，(0.16～8.83)，(0.12～5.18)，(0.0132～0.414)，(0.0155～0.25)，(0.0011～0.0383)，(0.002～0.068)%	依次为 0.29，0.35，0.22，1.84，1.31，4.84，2.75	—	81
混合稀土	La，Ce，Nd，Pr，Sm，Eu，Gd，Tb，Dy，Ho，Er，Tm，Yb，Lu，Y	聚酯薄膜-薄纸片法 XRF	依次为 0.6，0.5，0.5，0.6，0.3，0.1，0.4，0.02，0.2，0.2，0.2，0.09，0.2，0.1，0.1μg	(40～60)$mg \cdot ml^{-1}$	—	—	82
锌矿、黄铜矿、单矿物	S，Ca，Fe，Cu，Zn，Cd，As，Sn，Mn，Pb	XRF-薄样-比例常数法	依次为 0.25，2.2，1.2，0.25，0.78，3.3，2.5，1.3，0.67，2.1μg	—	—	—	83
西沙群岛贝壳	CaO，Al_2O_3，SiO_2，Fe_2O_3，P，Sr，Zn	XRF	依次为 20，8，10，5.0，5.0，1.1，1.4$\mu g \cdot g^{-1}$	—	依次为 0.13，3.33，1.9，1.59，3.53，0.44，4.69	—	84
土壤	Cu，Pb，Zn，Ni，Co，Cr，V，Mn	XRF	依次为 2.3，2.0，3.5，3.3，4.5，4.5，6.4，6.5$\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	—	85
—	V，Fe，Cu，Rb，Mo，Sn，Ba，Tb，W，Pb	能量色散 XRF	依次为 2.7，2.7，6.5，6.8，20，17，13，12，19，17g	—	—	—	86
Al-Cr-Si 膜和 Ti-Cr-Si 膜	Al，Ti，Cr，Si	XRF	依次为 20，6，10，20%	—	—	—	87
硫化铅锌矿	Pb，Cu，Zn	XRF	依次为 0.10，0.001，0.005%	依次为(0.1～71.50)，(0.001～1.20)，(0.005～51.00)%	—	—	88
彩玻管	Si，Ba，Na，K，Pb，Al，Ti，Fe，Mn，Sb，Co，Ni	XRF	—	—	依次为 1.05，2.17，1.69，4.51，5.86，5.54，1.55，8.41，5.34，3.25，8.77，3.18	—	89

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
饮料和含待测元素的炭化试样	Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、Ti、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Zr	XRF	依次为87、31、18、15、7、13、10、5.3、3.6、4.2、4.2、2.1、1.5、1.2、1.1、1.2μg·g^{-1}	0～2000(Na、Ca、Mg、P、K)，0～1000(Si、Al、Fe)，0～200(其他)μg·g^{-1}	依次为5.3、4.0、4.8、2.3、1.4、1.1、2.0、8.3、5.9、3.7、10.5、9.1、2.2、6.1、6.2、8.6	—	90
贻贝	K、Ca、Mg、Mn、Zn、Sr	XRF	依次为31、21、69、2.4、0.6、1.1μg·g^{-1}	依次为0.16%～0.42%、0.18%～0.535%、0.016%～0.25%、(33.5～117)μg·g^{-1}、(4.4～24.1)μg·g^{-1}、(5.2%～52.2%)	—	—	91
蒙脱石	Fe、Ca、Mg、Na、K	XRF	—	以氧化物表示，依次为(1.9～18.84)、(0.16～8.81)、(0.12～7.77)、(0.04～3.49)、(0.12～5.18)%	以氧化物表示，依次为3.48、3.29、0.83、9.31、2.92	—	92
土壤、水系沉积物	Al、Ca、Co、Cu、Fe、Ga、K、Mg、Mn、Na、Nb、Ni、Pb、Rb、Si、Sr、Th、Y、Zn、Zr	XRF	依次为103、38、0.5、0.9、6.7、1.0、43、62、5.3、240、1.6、1.3、2.2、0.6、284、1.4、1.4、0.6、1.8、1.2μg·g^{-1}	—	—	—	93
催化剂	Zn、Cu	XRF	—	Cu 0.04%～10%，Zn 0.08%～20%	Cu ±3.8，Zn ±3.9	—	94
磷矿石	Na、Mg、Al、Si、P、S、K、Ca、Ti、Mn、Fe	XRF	—	—	—	相对误差<1%	95
黄金首饰	Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Ni、Fe、Sn	XRF		Ag、Cu 2%～32%；Au 8%～24K；其他 0.05%～0.8%	Au (0.16～0.35)%，Ag (0.1～0.4)%，Cu (0.18～0.4)%，其他 1%～5%	—	96
—	Nb、Ta、Zr、Hf	共沉淀-XRF	依次为0.102、0.245、0.097、0.485μg	—	—	—	97
含铬试液	Cr(Ⅲ)、Cr(Ⅵ)	离子膜富集XRF	0.5μg	—	—	—	98
钐-钴磁粉	Co、Sm	XRF	—	—	Co 0.12～0.20 Sm 0.12～0.20	—	99
钙质贝壳	Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ba、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Pb、Sr	XRF	依次为22、15、5、3、4、4、7、5、—、9、2、3、3、3、2、3、1、μg·g^{-1}	依次为(0.0001～0.315)、(0.0014～9.02)、(0.0002～0.485)、(0.0002～0.426)、(0～0.106)、(0～0.1098)、(0.0001～0.277)、(0.0001～0.3055)、(33.87～40.04)、(0.0001～0.226)、(0.0006～1.35)、(0.0003～0.634)、(0.0001～0.147)、(0.0001～0.145)、(0.0001～0.137)、(0.0001～0.124)、(0.0005～1.04)%	依次为0.19、2.96、2.16、1.83、2.82、3.00、3.68、1.47、0.54、5.18、1.29、2.32、3.67、3.11、2.84、3.63、1.10	—	100
高冰镍	Fe	XRF	—	—	1.8	0.16(相对误差)	101

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
铁矿石	Fe, TiO_2, Mn, P, CaO, SiO_2, Al_2O_3	XRF	—	—	依次为 0.143, 0.0031, 0.061, 0.005, 0.01, 0.106, 0.053	—	102
土壤	SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, P, Ti, Mn, V, Ni, Co, Cr, Cu, Zn	铝环双层压片-XRF	P 0.26, Ti 15, Mn 5.9, V 4.6, Ni 2.2, Co 1.6, Cr 1.5, Cu 2.1, Zn 2.3 (单位 $\mu g \cdot g^{-1}$)	依次为 (32.61 ~ 90.34), (2.85 ~ 29.21), (1.9 ~ 18.84), (0.16 ~ 8.83), (0.08 ~ 7.74), (0.04 ~ 3.87), (0.12~5.18)%; (132 ~ 4140), (1270 ~ 20100), (155~2500), (15.9 ~ 250), (12.3 ~ 277), (5.4 ~ 99), (7.3~410), (11.5 ~ 383), (20.7 ~ 680)$\mu g \cdot g^{-1}$	依次为 0.26, 1.11, 0.25, 0.57, 2.31, 3.43, 0.27, 0.99, 0.38, 0.82, 3.16, 2.69, 4.10, 3.78, 2.37, 0.47	—	103
水样	Cr, Ni, Cu, Fe	XRF	依次为 1.33, 0.67, 0.87, 1.67 $mg \cdot L^{-1}$	—	—	4~9.8 (相对误差)	104
单一稀土元素样品	La_2O_3, GeO_2, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Sm_2O_3, Gd_2O_3, Y_2O_3	滤纸片法 XRF	依次为 0.39, 0.35, 0.5, 0.41, 0.36, 0.4, 0.14μg	—	—	—	105
污水、污泥	Mo, Cd, Pb, Cr, Cu, Zn	XRF	—	≤100(Mo 和 Cr), 1000 (Pb), ≤ 2000 (Cr 和 Cu), 5000 (Zn)$\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	106
硅酸岩石	Zr, Zn, Ni, Cr, Y, Rb, V	XRF	依次为 1.6, 0.55, 0.62 ~ 0.67, 0.69, 2.2, 2.2, 3.4$\mu g \cdot g^{-1}$	依次为 (100 ~ 500), (30 ~ 1350), (3 ~ 35), (135 ~ 2500), (10~2500), (20 ~ 70), (5 ~ 1500), (20~450) $\mu g \cdot g^{-1}$	依次为 4.9, 0.82, 0.82 ~ 3.6, 1.4, 1.5, 4.3, 6.3	—	107
苏丹人头发	Fe, Ni, Cu, Zn, Pb	共沉淀-XRF	依次为 2.2, 0.6, 0.4, 0.3, 0.4$\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	—	108
铌钽和稀土类单矿物	La_2O_3, GeO_2, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Sm_2O_3, Eu_2O_3, Gd_2O_3, Tb_4O_7, Dy_2O_3, Yb_2O_3, HO_2O_3, Lu_2O_3, Er_2O_3, Y_2O_3, ThO_2, U_3O_8, Nb_2O_5, Ta_2O_5, TiO_2, MnO_2, Fe_2O_3, Tm_2O_3	XRF	依次为 0.0079, 0.0064, 0.0073, 0.0062, 0.0083, 0.0079, 0.0067, 0.0067, 0.0074, 0.5073, 0.0069, 0.0092, 0.0075, 0.0014, 0.0027, 0.0032, 0.009, 0.013, 0.0057, 0.0039, 0.0046, 0.0087%	—		相对误差 2.43, 0.17, 1.43, 3.66, 2.82, 10.9, 4.34, 19.6, 15.5, 16.9, 3.7, 7.69, 4.2, 0.35, 12.2	109
润滑油	Ca, Ba, Cu, Fe, Zn, P, S, Cl	XRF	—	—	依次为 4.6, 3.0, 2.8, 3.7, 2.5, 4.3, 2.7, 0	相对误差 4.63, 2.97, 2.76, 3.73, 2.51, 4.29, 2.7, 0	110

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
氧化铥	Ho，Lu，Y，Dy，Er，Yb	XRF	依次为0.002，0.002，0.002，0.005，0.005，0.01%	—	—	—	111
岩石	As	溶剂萃取XRS	—	≤400μg·g⁻¹	—	74～105	112
面粉、大米	K，Ca，Mn，Zn，Fe，Cu，As，Se	XRF	—	依次为2.4，2.0，0.3，0.2，2.0，0.2，0.1，0.1μg	依次为3.5，1.6，1.8，1.2，2.9，6.2，6.6，5.2	…	113
岩石、矿物	Mo，W	溶剂萃取XRF	2，10μg·g⁻¹	(0～200)μg	4.8，6.5	—	114
蔬菜、草本植物试样	As，Se	共沉淀-XRF	0.1μg·g⁻¹	>25μg·g⁻¹	<3	—	115
燃料、残油	Si，Ni，V	XRF	依次为20，0.8，0.8μg·g⁻¹	—	依次为1.1，1.5，1.0	—	116
高纯氧化镥	Er，Tm，Yb，Y	XRF	…	0.002%～1%	—	—	117
西沙群岛石珊瑚	CaO，Al_2O_3，SiO_2，Fe_2O_3，P	XRF	依次为20，80，10，5.0，5.0μg·g⁻¹	依次为0.22，2.84，1.36，0.97，1.72	—	—	118
湿法冶金工艺试样	Mn，Fe，Co，Ni，Cu，Mo，Pt，Rh，Pd，Ir	薄层法XRF	依次为0.01，0.01，0.01，0.01，0.01，0.004，0.01，0.03，0.05，0.02g·L⁻¹	(0.01～5.0)g·L⁻¹	—	—	119
降雪	Cl，Br，I	沉淀-XRF	依次为0.2，0.1，0.5μg	—	依次为1.6～5.0，1.4～4.6，2.2～8.2	依次为97.9～103.1，97.0～100.5，100.1～103.2	120
复合渣	MgO，Al_2O_3，SiO_2，CaO，MnO，Fe，P_2O_5，TiO_2	XRF	—	依次为(3～18)，(1～10)，(10～27)，(20～50)，(1～7)，(1～30)，(1～7)，(0.2～1)%	依次为0.139，0.109，0.127，0.225，0.021，0.118，0.033，0.006	相对误差 MgO-11.5～0，Al_2O_3-1.3，$SiO_2$0.7～2.4，CaO0.7～1，MnO-4.1～1.0，Fe-1.5～0.7	121
生油岩	V，Ni	滤纸片法XRF	0.32，0.35μg	—	3.1，4.3	98～105，97～106	122
岩石、土壤	Nb，Ta，Zr，Hf，Ti，La，Sm，Er	化学富集XRF	依次为0.062，0.13，0.24，0.13，0.181，0.83，0.51，0.48μg	—	依次为1.87，11.1，3.61，10.3，3.07，2.84，8.89，13.7	—	123
泥炭	Br，Cl，S，P	XRF	—	依次为(20～40)，(200～500)，(300～1000)μg·g⁻¹，(0.2～3)%	—	相对误差 0.8～11，-11～8.1，-2.2～7.8	124
岩石	Ba，Sr	XRF	2.5，35μg·g⁻¹	≥0.01%	—	—	125
河水	磷酸盐，砷酸盐	XRF	P2μg·L⁻¹，As6μg·L⁻¹	(4～1000)，(7～1500)μg·L⁻¹	—	—	126
钛合金	Fe，Cu，Ni	共沉淀-XRF	依次为8.1，0.8，1.4μg·g⁻¹	—	Fe 9.2，Cu 11.0，Ni 18.0	—	127
矿石	W	能量色散XRF	100μg·g⁻¹	≤2%	—	—	128
真空触头合金	Te，Cu	XRF	—	—	Te 2.61，Cu 0.25	99.76，99.28	129
高纯钽	Ti，Nb，W，Fe，Mo	薄膜XRF	(0.05～3.6)μg	(25～500)μg	—	—	130
高纯氧化铝	Ce，La，Nd，Pr，Sm	共沉淀-XRF	依次为0.65，0.5，0.5，0.59，0.47μg	—	1.4～3.6，1.6～3.2，1.7～2.9，1.6～2.9，1.8～3.7	—	131

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
硫化锌基质的铅	As	XRF	$15\mu g \cdot g^{-1}$	$(60\sim4000)\mu g \cdot g^{-1}$	1.48	—	132
矿石	Au	能量色散 XRF	$0.1\mu g$	$(1\sim30)\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	133
岩石、矿物	Nb_2O_5，Ta_2O_5	滤纸片法 XRF	—	—	0.43，0.41	相对误差 0.68，1.45	134
—	Rh	XRF	$6\mu g \cdot g^{-1}$	—	20	—	135
岩石、矿物	F	XRF	$32\mu g \cdot g^{-1}$	≤4%	—	—	136
灰铸铁	Ti	波长色散 XRF	—	$(300\sim2500)\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	137
特种耐腐蚀钢	Ru，Pt	薄膜 XRF	$6,12\mu g \cdot g^{-1}$	—	0.1～1	—	138
硅酸盐耐火材料	P_2O_5，MnO	XRF		P_2O_5，0.01～0.5，0.5～5，MnO0.005～0.5	2.83，3.33		139
全血、血清、脑脊液	Zn，Cu，Fe，Ca，K，Al，Cl，S，P，Mg，Na，Si	滤纸片法 XRF	依次为 0.03，0.09，0.1，0.21，0.5，0.08，0.08，0.08，0.07，0.25，4.8，0.03μg	—	依次为 2.6，13，1.7，5.7，1.8，11，1.8，1.6，5.7，6.0，2.4，7.9	依次为 100，92.3，104，97.2，98.7，114，101，98，96.8，91.2，102.6，90	140
岩石、矿物	Rb，Sr，Zr，Nb，Mo	XRF	—	—	依次为 1.6，2.0，1.7，1.8，1.3	相对误差依次为 4.6～14.6，-2.2～1.5，-2.1，-6.9～3.2，-2.6～8	141
硅酸岩石	Cr，V，Ba	能量色散 XRF	依次为 7.0，5.2，$31\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	—	142
硅片	Cr，Co	XRF	3×10^{14}原子$\cdot cm^{-2}$	$4\times10^{15}\sim2\times10^{17}$原子$\cdot cm^{-2}$	—	相对误差<7	143
铜	Sb，Sn，Bi，Pb，As，Fe	XRF	—	(0～200)μg（除 Fe 外）	1.0～15.5	—	144
稀土永磁合金	Nd，Co，Fe	滤纸片法 XRF	依次为 3.63，2.20，$0.70\mu g \cdot cm^{-2}$	—	依次为 0.34，0.07，0.44	相对误差依次为 0.3，0.7，0.3	145
白云石、磷灰石	Hg，Ag，Pb，Cd，La，Ce，Nd	XRF	(1～2)μg	(1～500)μg	—	—	146
矿石、含碳物质	U_3O_8	XRF	$7.5\mu g \cdot g^{-1}$	$(0\sim1000)\mu g \cdot g^{-1}$		—	147
—	Zr，Hf	XRF	$0.4,1.2\mu g \cdot g^{-1}$	$(0.5\sim200)\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	148
石膏	Ti，Al，Fe	沉淀 XRF	依次为 0.15，0.15，0.58μg	(0～50)μg	依次为 1.3，1.4，2.6	98.2，97.8，100.9	149
混合稀土氧化物	Nd_2O_3，Sm_2O_3	XRF	—	—	0.083，0.076	相对误差 3.95，0.13	150
人发	Sr，Se，Zn，Cu，Ni，Fe，Mn，Cr	XRF	依次为 2，0.2，0.1，0.1，0.3，0.5，0.7，$0.2\mu g \cdot g^{-1}$	—	依次为 3，5.09，0.78，2.39，5.7，1.3，3.73，10	相对误差依次为 5.57，1.52，2.65，9.18，—，4.57，-3.78，3.7	151
稀土矿	Y，Yb，Lu，Dy，Tm，Er，Tb，Gd，Nd，La	XRF	依次为 0.26，0.45，0.14，0.41，0.56，0.44，0.8，0.35，0.96，0.69μg	—	依次为 4.63，5.26，-，6.24，3.37，5.83，13.27，7.42，4.12，—	依次为 94.58，114.05，—，111.1，163，104.7，86.67，111.4，78.43，—	152
混合稀土氧化物	La_2O_3，GeO_2，Pr_6O_{11}，Nd_2O_3，Sm_2O_3，Eu_2O_3，Gd_2O_3，	XRF	—	依次为(0～80)%，(0～30)%，(0～10)%，(0～80)%，(0～60)%，(0～10)%，(0～40)%，	依次为 1.5，1.19，1.18，0.75，3.3，0.93，2.08，	相对误差依次为 1.6，0.73，2.3，1.4，1.7，0.5.7，	153

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
混合稀土氧化物	Tb_4O_7, Dy_2O_3, Yb_2O_3, Ho_2O_3, Lu_2O_3, Er_2O_3, Y_2O_3, Tm_2O_3, Yb_2O_3, Lu_2O_3	XRF	—	依次为(0～10)%,(0～15)%,(0～5)%,(0～5)%,(0～2)%,(0～5)%,(0～2)%,(0～80)%	依次为 1.79, 2.24, 2.53, 2.59, 2.23, —, 1.71	依次为 1.3, 0.23, 8.8, 0.85, 22.5, 6.6, 64.2, 0.53	153
锆镁合金	Y, Sc, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	XRF	依次为 2.31, 0.13, 0.70, 0.45, 0.61, 0.73, 0.83, 0.69, 0.78, 0.69, 0.71, 0.61, 0.53, 0.53, 0.53, 0.54$\mu g \cdot g^{-1}$	0.0001%～80%	依次为 0.71, 6.78, 0.78, 0.11, 2.12, 1.48, 0.16, 10.89, 2.00, 4.28, 2.19, 1.36, 2.08, 8.90, 2.62, 2.82	—	154
白钨矿、黑钨矿、精矿和矿渣	W, Sn	XRF	6.4$\mu g \cdot g^{-1}$	0.2%～75%	—	—	155
石灰石、白云石	Zn, Rb, Sr, Zr, Ba	能量色散 XRF	(2～10)$\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	—	156
铌铁矿、钽铁矿	Nb, Fe, Sn, Ta, Mn, W, V, Ti, Zr, Y, Th	波长色散 XRF	(8～55)$\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	—	157
植物样品	Na_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, K_2O, CaO, Fe_2O_3, P, Ti, Mn, Cu, Rb, Sr, Ba, Ni, Zn, Pb, Cr, V, Co, Y, Nb, Cl, As, Mo, Br, Ga	XRF	依次为 66, 15, 12, 13.5, 6, 2, 3, 2.6, 3.5, 2.1, 1, 2, 0.9, 5.3, 3, 1.5, 1.62, 1, 0.9, 0.54, 0.54, 0.6, 5, 0.5, 0.9, 0.52, 1.44$\mu g \cdot g^{-1}$	依次为(0.0144～0.49), (0.0188～0.6), (0.089～2.83), (0.383～12.25), (0.06～3), (0.097～7.0), (0.147～1.176)%; (25.5～3000), (116～928), (24～3000), (9.6～76), (5.9～47), (6～616), (8.3～66), (2～156), (3.6～1000), (7.85～63), (9.5～50), (5～50), (5～50), (5～50), (1～10), (200～3000), (5～50), (0.6～18.4), (5～100), (0.74～6)$\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	158
青铜	Nb, Zn, Zr, Nd	XRF	10$\mu g \cdot g^{-1}$	依次为(0.05～0.5), (1～10), (0.05～0.3), (0.2～0.5)%	依次为 0.02, 0.0026, 0.018, 0.014	—	159
岩样	U, Th, K	XRF	依次为 0.2, 1, 10$\mu g \cdot g^{-1}$	—	—	—	160
球墨铸铁	La, Ce	波长色散 XRF	3.7, 3.1$\mu g \cdot g^{-1}$	(3～30), (3～60)$\mu g \cdot g^{-1}$	5.3, 2.2	—	161
铬	Ca, Cu, Fe, Ni, Mo, Pb	XRF	依次为 1.5, 4.9, 5.0, 2.7, 9.5, 22.6$\mu g \cdot g^{-1}$	—	依次为 2.3, 6.1, 2.7, 5.3, 8.3, 12.1	—	162
含 Y 和 U 的试样	Y, U	XRF	1μg	(5～200)μg	4	—	163
褐帘石	La, Ce, Pr, Sm, Gd, Nd, Th, U	XRF	—	依次为(0.5～10), (2～20), (0.1～2), (0.1～2), (0.1～2), (0.5～10), (0.2～4), (0.2～4)%	约 0.5～5	—	164

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 cv/%	回收率 w/%	文献
—	U、Np、Pu等	XRF	0.15μg·g⁻¹	(0.02~0.2)%	—	—	165
富硫酸盐风蚀材料	Sn、Ag、Sb、Ge、As、Cd	XRF	依次为23,18,31,6,20,20μg·g⁻¹	—	—		166
原油、石油	V、Fe、Ni、S	TXRF	依次为0.6,0.1,0.4,20μg·g⁻¹	—	依次为3.8,2.6,3.2,1.7	相对误差4%	167
油	Ti、Cr、Fe、Cu、Pb	TXRF	(0.8~4)μg·g⁻¹	≤5000μg·g⁻¹	—	—	168
洋葱	Fe、Cu、Zn、Ca	TXRF	—	(0.05~5)μg·g⁻¹	—	—	169
—	Se	TXRF	7.2ng·ml⁻¹	—	<5	—	170
硅片	Cr、Fe、Ni、Cu	TXRF	10⁹原子·cm⁻²	—	—	60~95	171
硅片	Cr、Co、Ni	TXRF	—	(5×10¹⁵~1.6×10¹⁷)离子·cm⁻²	6	—	172
超纯试剂	Al、P、S、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、As、Sr、Zr、Mo、Cd、Sn、Ba、Pb	TXRF	(20~100)pg·ml⁻¹	—	5~20	—	173
人全血	Pb	TXRF	(1~20)μg·g⁻¹	—	5~15	相对误差(5~20)%	174
船用油和淤渣油	Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Pb	TXRF	依次为16.65,3.43,6.53,2.49,5.01,11.65,4.78,2.48,4.44,4.73μg·g⁻¹	—	除Ti22,其他18	除Ca 137,其他(107~113)	175
地质材料	Cd、Ce、La、Nd、Dy、Th	TXRF	依次为0.167,0.058,0.077,0.082,0.061,0.016μg·g⁻¹	Cd(0.07~1.16),Ce(0.88~2.43),La(1.03~3.25),Nd(0.05~0.73)%	—	—	176
地质试样	Ru、Rh、Pd	SXRF	0.003μg·g⁻¹	—	—	—	177
头发	Ca、Fe、Zn、Cu	SXRF	依次为46.4,53.2,65.3,46.8ng	—	—	—	178
水标样、生物标样等	Ni、Cu、Zn	SR-TXRF	依次为2.67,2.03,0.68μg·g⁻¹	—	—	—	179
—	Nd、Sm、Gd、Tb、Dy、Ho、Tm、Lu	PIXE	10μg·L⁻¹	—	—	95.9~101.2	180
独居石	La、Pr、Nd	PIXE	依次为5.2,9.2,25.3μg·cm⁻²	—	—	—	181
催化剂	Pt	PIXE	10μg·g⁻¹	(30~700)μg·g⁻¹	—	—	182
合金	Pb、Sn	PIXE	500,10μg·g⁻¹	—	—	—	183
人肺	Si、P、K、Ca、Ti、Cr、Fe、Cu、Zn	PIXE	依次为6000,8000,5000,1000,200,120,100,60,60μg·g⁻¹	—	—	—	184
儿童血液	Pb	PIXE	—	(0.1~60)μg·ml⁻¹	—	—	185
锌铅矿石	Fe、Zn、Pb	PIXE	—	依次为(3.5~26),(0.5~9),(0.05~5)%	依次为3.6,6.2,9.2	—	186

续表

应用	测定元素	分析方法	检出限	测定范围	变异系数 $cv/\%$	回收率 $w/\%$	文献
放射性矿物	U、Th	PIXE	13、108μg·g^{-1}	—	—	—	187
硒酵母	Se	PIXE	—	—	2.8～3.4	95.0～103.0	188
低合金钢、不锈钢	P	电子探针	约 30μg·g^{-1}	0.01%～0.03%	<10	—	189
催化剂	Cl	电子探针	—	0.1%～1.0%	<10	—	190

本表参考文献：

1 Georgiades C A. J Assoc off Anal Chem, 1990; 73(3): 385
2 Шаяхметова Н М, Тюхмирова Т Н, Стефанов А В……. Жанал хим, 1993; 48(10): 1584
3 赵尔燕，邱林友．理化检验(化学分册)，1994；30(2)：106
4 邱林友，赵尔燕．矿物岩石，1992；12(4)：109
5 Balaes AME. Appl Spectrosc, 1986; 40(8); 1190
6 Dmitriev S N, shishkina TV, Zhuravlava E L et al. Anal Chim Acta, 1991; 243(1): 81
7 赵尔燕，邱林友．黄金，1993；14(12)：47
8 Peraniemi S, Parkkinen J et al, Fresenius' J Anal Chem. 1992; 343(3); 292
9 赵尔燕，邱林友．分析测试学报，1996，15(3)：53
10 Schuster M, Mueller L, Mauser K E et al. Thin solid Films, 1988; 157(2): 325
11 刘德慧，安庆骧．岩矿测试，1988；7(4)：271
12 Vandecasteele C, Alluyn F, Dewaele J et al. Anal Chem, 1985: 57(13): 2549
13 杉本太、岩谷浩树，前田嘉道等．日本化学会誌，1990；(7)：804
14 Chow A, Yamashita G F, Hamon R F. Talanta, 1981; 28(7): 437
15 渡边勇．分析化学(日)．1991；40(2)：T25
16 加藤研作．分析化学（日），1981；30(1)：73
17 Marcelo S C, Joao A M, Armi W N et al. Talanta, 1995; 42(1): 45
18 Khan A S, Chow A. Anal Chim Acta, 1990; 238(2): 423
19 Семенова Е В, Блохина Г Е, Величко Ю Н. Завод лаб, 1989; 55(4): 39
20 赵尔燕，邱林友．分析仪器，1994；(1)：45
21 Kotrly S, Sramkova J et al, Analyst. 1993; 118(1): 79
22 Holynska B, Ostachowicz B, Wegrzynek D. J Trace Elem Electrolytes Health Dis, 1991; 5(1): 31
23 Eckert J M, legget K E A, Keene J B et al. Anal Chim Acta, 1989; 222(1): 169
24 Bubert H, Burba P, Klockenkaemper R et al. Fresenius' J Anal Chem, 1991; 341(1/4): 245
25 杉崎満寿雄，牧野一朗，布施美智雄．分析化学(日)，1982；31(5)：285
26 Peraniemi S, Vepsalainen J et al. Fresenius' J Anal Chem, 1992; 344(3): 118
27 Galloo J C, Guillermo R, Leonardis T et al. Analysis, 1989; 17(10): 576
28 Lafisca T A, Nagourney S J, Pietarinen C. Talanta, 1991; 38(9): 995
29 曹金平，张文泽．光谱实验室，1989；6(4)：195
30 马光祖，罗立强．分析化学，1989；17(5)：428
31 茅祖兴，鲁豪东．理化检验(化学分册)，1989；25(2)：66
32 周学军，王庆广，庄亚辉．环境化学，1989；8(6)：41
33 Pasitschniak A. X-Ray Spectrom, 1986; 15(3); 197
34 王修德，黄衍初，庞淑薇．光谱学与光谱分析，1992；12(2)：119
35 Auuyn F, Doms R, Hoste J. Anal Chim Acta, 1985; 172; 119
36 邱林友，赵尔燕．仪器仪表与分析监测，1992；(3)：32
37 Mino Y, Ota N. Chem Pharm Bull, 1990; 38(8); 2208
38 Veverka I, Maly L. Hutn Listy, 1989; 44(6): 428
39 Jacobs J J, Balaes A M E. Kep Natl Inst Metall Cs Afr, 1980; (2054): 9
40 Relandts I. Anal Chem, 1983; 55(9): 1637
41 魏启宗，分析测试通报，1990；9(1)：43
42 Marigo A, Gerbasi R, Zanella P et al. Ann Chim, 1981; 71(7/8): 425
43 Karadzhov M. Dokl Bolg Akad Nauk, 1988; 41(6): 59
44 Hemens C M, Elson C M. Analyst, 1988; 113(1): 197
45 严家才，杜旭东，尹中林．分析试验室，1987；6(1)：15
46 管沛林．分析试验室，1993；12(6)：75
47 冯德友．理化检验(化学分册)．1989；25(4)：225
48 郝贡章，吴长存，李明洁．分析化学，1985；13(10)：778
49 马 场，柏 治，武腾博．分析化学(日)．1983；32(8)；T99
50 袁汉章，刘 洋，贾乐庚．分析化学，1989；17(7)：625
51 陈领志，刘云凤．分析试验室，1989；8(5)：40
52 Zebreva A I, Philippova L M, Andreeva N N et al. Anal Chim Acta, 1987; 195; 357
53 Schafer C, Haupt O, Dannecker W. Fresenius' J Anal Chem, 1996; 355((3/4); 379
54 Holynska B, Lankosz M, Vkcevicl. J Rdioanal Nucl Chem, 1984; 85(4): 237
55 Gimeno Adelantado J V, Peris Martinez V et al. Anal Chim Acta, 1993; 276(1): 39
56 张启超，贺春福，任红星．光谱学与光谱分析，1992；12(1)：89
57 Boehmer R G, Psotta P K. Fresenius' J Anal Chem, 1990; 336(3); 226
58 陆少兰，李世珍，郝贡章等．分析试验室，1995；14(1)：66
59 刘亚雯，李道伦，胡金生等．光谱学与光谱分析，1992；12(4)：83
60 喻德科．光谱学与光谱分析，1992；12(5)：111
61 曾 力，陈远盘．光谱学与光谱分析，1993；13(1)：131
62 杨德辉，郑荣华，李叶农等．分析测试学报，1995；14(5)：1
63 贾乐庚，崔凤辉，于敏贤等．分析试验室，1989；8(6)：30
64 黄鑫泉，胡浩雪，李杜若．光谱实验室，1989；6(5)：239
65 李国会，卜 维，樊守忠．光谱学与光谱分析．1994；

14(1)：105
66 李国会．光谱学与光谱分析，1989；9(1)：66
67 姜桂兰，曹淑琴，王多禧等．分析化学，1994；22(1)：47
68 陈永君，梁国立，宋尔良．分析试验室，1987；6(2)：12
69 许　力，张运国．理化检验(化学分册)，1987；23(2)：100
70 Bhagavathy V，Sai P S T，Pao T P et al. Anal Lett，1989；22(1)：197
71 殷秀文，郝贡章．分析试验室，1996；15(1)：80
72 田中茂，中村优，桥本芳一．分析化学(日)，1987；36(2)：114
73 李　敏，陈远盘，苏惠娜．光谱学与光谱分析，1992；12(3)：111
74 杨晓辉，张树尉，高发奎等．光谱学与光谱分析，1993；13(1)：137
75 Alben K F. Anal Chem，1985；57(13)：2545
76 喻德科．分析化学，1993；21(2)：190
77 包生祥．分析测试通报，1989；8(3)：72
78 庞杏英，顾兰芬，庄向平等．分析测试通报，1992；11(6)：69
79 陈永君．光谱学与光谱分析，1993；13(1)：149
80 许益民，陈建伟，王惠新等．分析化学，1992；20(2)：219
81 喻德科．分析化学，1992；20(2)：176
82 张启超，王子尧，贺春福等．光谱学与光谱分析，1991；11(3)：66
83 贺慧明，陈远盘，张玉清．光谱学与光谱分析，1991；11(2)：54
84 喻德科．分析测试通报，1991；10(6)：33
85 宋云阁，于清池，韩明华．中国环境科学，1990；10(1)：67
86 陈远盘．分析化学，1990；18(10)：974
87 郝贡章，吴长存，许佩珍等．分析试验室，1987；6(9)：10
88 丁雪心．光谱学与光谱分析，1994；14(1)：111
89 孙世清，黄永文．分析试验室，1994；13(1)：78
90 包生祥．分析化学，1995；23(5)：522
91 王庆广，谢光国，黄衍初．光谱学与光谱分析，1991；11(6)：45
92 喻德科．分析化学，1993；21(6)：704
93 黄衍初，王庆广．环境化学，1988；7(4)：34
94 张关云，樊　蕴，张万宝等．分析化学，1988；16(7)：660
95 茅祖兴．分析化学，1988；16(10)：909
96 陈远盘，柏仲平．光谱学与光谱分析，1993；13(6)：91
97 张建军，马先祖．分析试验室，1994；13(2)：77
98 邱林友，赵尔燕．光谱学与光谱分析．1993；13(5)：111
99 卜赛斌．分析化学，1996；24(7)：841
100 包生祥，沈平．分析化学，1992；20(6)：688
101 赖万昌，分析试验室，1995；14(5)：11
102 王莉莉，耿玉良，王松青．分析试验室，1988；7(8)：16
103 喻德科．分析测试通报，1992；11(5)：84
104 Казаринов М Н，Полевич О В. завод Лаб1987；53(2)；24
105 赵贵文，唐予奇，毛振伟．中国科技大学学报，1987；17(3)：419
106 Lucke N，Wehner B，Thi Hong L T et al. Acta Hydrochim Hydrobiol，1991；19(3)：275
107 Pascual J. Talanta，1987；34(12)：1027
108 Eltayeb M A H，Van Grieken R E. J Radioanal Nucl Chem，1989；131(2)：331
109 陈永君，刘以建．分析化学，1991；19(5)：560
110 陈锁志，曾妩．分析化学，1991；19(7)：封3
111 Chandola L C，Khanna P P. J Radioanal Nucl Chem，1988；121(1)：53
112 Vivit D V，Lindsay J R. Open File Rep. US Geol Surv，1987：11
113 张启超，王子尧，贺春福等．分析化学，1991；19(9)：1072
114 Sen N，Roy N K，Das A K. Talanta，1989；36(6)：697
115 Horler B A T. Analyst，1989；114(8)：919
116 Denoyer E R，Siegel L A. Anal Chim Acta，1987；19(2)：361
117 Chandola L C，Khanna P P. Indian J Pure Appl Phys，1987；25(4)：157
118 喻德科．分析化学，1991；19(1)：126
119 Veverka I，Maly L，Vidmar A. Chem Listy，1987；81(10)：1089
120 山本隆彦．分析化学(日)，1987；36(10)：592
121 高树桢，朱一钧，高新华等．光谱学与光谱分析，1984；4(3)：35
122 喻德科．光谱学与光谱分析，1994；14(5)：91
123 刘庆惠，陈远盘．光谱学与光谱分析，1995；15(6)：99
124 Andersson M，Olin A. Talanta，1990；37(2)：185
125 ОайсуЕва Т С，Гуничева Т Н. Финкелбштейн. А Л. Ж анал хим，1990；45(1)：160
126 Engei G，Ostner R，Bessner H. Chem Ztg，1989；113(12)：382
127 岩田嘉人，石桥妖一，郡司直树等．分析化学(日)，1991；40(7)：361
128 Arikan P，Zararsiz A，Efe N. J Radioanal Nucl Chem，1986；100(2)：355
129 宁德亮，赵　莹．理化检验(化学分册)，1995；31(5)：287
130 Eddy B T，Balaes A M E. X-Ray Spectrom，1988；17(5)：195
131 猪熊康夫，远藤丈．分析化学(日)，1988；37(10)：503
132 Baucells M，Lacori G，Roura M et al. Analyst，1988；113(8)：1325
133 Kasrai M，Fozoonmayeh L，Payrovan H. X-Ray Spectrom，1988；17(6)：219
134 荆照政．理化检验(化学分册)，1991；27(3)：158
135 Змиевская Н Р，Савичев А Т，Фадеева В И……，Ж анал хим．1987；42(8)；1467
136 Schaefer H P，Meduna J V. Fresenius' Z Anal Chem，1987；326(6)，558
137 Alluyn P，Dams R. J Trace Microprobe Tech，1987；5(2/3)：211
138 Eddy B T，Balaes A M E，Hasty R A et al. Appl Spectrosc，1987；41(8)：1442
139 冯德友．理化检验(化学分册)，1987；23(4)：225
140 李　冶，程　泽，张月芬．理化检验(化学分册)，1993；29(5)：297
141 陈　武，陈文河．理化检验(化学分册)，1986；22(4)：234
142 Potts P J，Webb P C，Watson J S. J Anal At Spectrom，1986；1(6)：467
143 Klockenkaemper R，Becker M，Bubert H et al. Anal Chem，1990；62(15)：1674
144 倉田奈津子，原田芳文，古野义一．分析化学(日)，1989；38(4)：193
145 宁德亮．理化检验(化学分册)，1988；24(2)：106

146 Gregorowicz Z, Stee H, Ciba J. Fresenius' Z Anal Chem, 1981; 307(5): 412

147 Tolmay K T, Jacobs J J. Rep Natl Inst Metall C S Afr, 1980; (2034): 21

148 Kicci, Enzo. Anal Chem 1980; 52(11): 1708

149 吉川征二、中村隆一. 分析化学(日). 1981; 30(1): 17

150 陆少兰，许佩珍，李世珍等. 理化检验(化学分册), 1988; 24(5): 258

151 荆照政，吴　珑. 理化检验(化学分册), 1988; 24(6): 366

152 毛振伟,张邦祥,李凡庆. 理化检验(化学分册), 1993; 29(4): 239

153 乐　群. 理化检验 (化学分册), 1991; 27(4): 207

154 荆照政、张博义. 理化检验(化学分册), 1989; 25(6): 355

155 Balaes A M E, Jacobs J J, Bray A K et al. S Afr J Chem, 1984; 37(5): 124

156 Johnson R G, palmer C A, Dennen K O et al. Appl Spectrosc, 1986; 40(1): 76

157 Tikoo B N, Liswanathan S. X-Ray Spectrom, 1986; 15(2): 95

158 李国会，仲平，樊守忠. 理化检验(化学分册), 1988; 24(3): 161

159 Елинсон С В, Нжевскин В С. Кмара Ю М……, Жанал хим, 1983; 38(9): 1570

160 Galssn D A, Atkin B P, Harvey P K. Chem Geol, 1983; 38(3/4): 225

161 Alluyn F, BiuietJ, Dams K et al. Anal Chim Acta, 1983; 155: 209

162 Chandola L C, Khannd P P. Mikrochim Acta, 1984; I(1/2): 149

163 Mapteu C J. Hansel J M. LosA Alamos Natl Lab LA, 1983; 6

164 Beuay V P, Deshpande S S, Dixit R M et al. Fresenius' Z Anal Chem, 1981; 309(5): 380

165 Berdikov V U, Grigorer O I, Iokhin B S. J Radioanal Chem, 1982; 68(1/2): 181

166 Ortiz-Gonzalez R, Perez-Sirvent C et al. Int J Environ Anal Chem, 1991; 45(4): 275

167 Ojeda N, Greaves E D et al. Spectrochim Acta Part B, 1993; 48B(2): 247

168 Bilbrey D B, Leland D J, Leyden D E et al. X-Ray Spectrom, 1987; 16(4): 161

169 Eller R, Weber G, Fresenius' Z Anal Chem, 1987; 328(6): 492

170 刘亚雯、范钦敏，魏成连等. 光谱学与光谱分析, 1993; 13(3): 69

171 Neumann C, Eichinger P. Spectrochim Acta Part B, 1991; 46B(10): 1369

172 Klockenkaemper R, Becker M, Bubert H. Spectrochim Acta Part B, 1991; 46B(10): 1379

173 Prange A, Kramer K, Reus U. Spectrochim Acta Part B, 1991; 46B(10): 1385

174 Ayala R E, Alvarez E M, Wobrouschek P. Spectrochim Acta Part B, 1991; 46B(10): 1429

175 Schirmacher M, Freimann P et al. Spectrochim Acta Part B, 1993; 48(2): 199

176 Muia L, Van Grieken R. Anal Chim Acta, 1991; 251(1/2): 177

177 Khvostova V P, Golovnya S V et al. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 1991; A308(1/2): 312

178 吴应荣，洪　蓉，肖延安等. 光谱学与光谱分析, 1992; 12(6): 99

179 潘巨祥，吴应荣，肖延安等. 光谱学与光谱分析, 1996; 16(4): 75

180 Bhagavathy V, Sai P S T, Pao T P et al Anal Lett, 1989; 22(1): 197

181 Leenanupan V, Kewsuwan P. J Radioanal Nucl Chem, 1987; 108(5): 289

182 Stojic D L, Pavlovic M S, Vasic V M et al. Anal Chim Acta, 1988; 209(1/2): 185

183 Raisanen J. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B, 1987; B22(1/3): 442

184 Annegarn H J, Pillay A E, Davies J C A et al. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B, 1988; B35(3/4): 415

185 Lal M, Joseph D et al. Sci Total Environ, 1991; 103(2/3): 209

186 Holynska B, Lankosz M, Vrcevic L. J Radioanal Nucl Chem, 1984; 85(4): 237

187 Arkian P, Alkan I. J Radioanal Chem, 1981; 67(2): 403

188 张　新，翟清波，薛美娜等. 分析测试通报, 1987; (4): 35

189 Mainy D, Neetoux J P, Blondeau R. Bull Cercle Etud Met, 1986; 15(12): 61

190 Koshy V J, Rao K V, Kalpana G et al. Talanta, 1992; 39(1): 17

参 考 文 献

1 Yoneda Y, Horiuchi T. Rew Sci Instrum, 1971; 42: 1069

2 Wobrauschek P, Aiginger H. Anal Chem, 1975; 17(6): 852

3 Елохин М А, физика рент. Лучей Москва, 1957; 193

4 Klockenkamper R, Bohlen A V. J Anal At Spectrom, 1992; 7: 273

5 Jaklevic J M, Giaugue R D, Thompson A C. X-Ray Spectrom, 1990; 19(2): 53

6 陈远盘. 分析化学, 1990; 18(10): 974

7 陈远盘. 光谱学与光谱分析, 1995; 15(2): 103

8 柴之芳. 分析试验室, 1992; 11(6): 39

9 李学军、巢志瑜等. 物理, 1993; 22(9): 553

10 Dzubag T G et al. Nucl Instrum Methods, 1974; 115: 297

11 Howell R H et al. Adv X-Ray Anal, 1974; 18: 265

12 Kaufman K et al. Adv X-Ray Anal, 1974; 18: 247

13 Wobrauschek P et al. X-Ray Spectrometry, 1980; 9(2): 57

14 Hockel J, Brumme M, Wienert A et al. X-Ray Spectrom, 1991; 20(6): 289

15 Zeng X H, Wu X K et al. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B, 1993; B75(1/4): 99

16 朱节清，乐安全等. 核技术，1993；16(7)：385
17 Mccue J C，Bird L L，Ziegler C A et al. Anal Chem，1961；33：41
18 Ziegler C A，Bird L L. Chleck D J. Anal Chem，1959：31：1794
19 Dwiggins C W. Anal Chem，1961；33：67
20 Dwiggins C W. Anal Chem，1964；36：1577
21 Toussaint C J，Vos G. Appl Spectrosc，1964；18：171
22 Park R L，Houston J E，Schreiner D G. Rev Sci Instrum，1970；41：1810

第四篇　紫外-可见光谱分析法

第十三章　紫外-可见光谱分析的原理、光谱数据与仪器

第一节　紫外-可见吸收光谱的基本原理

一、紫外-可见吸收光谱的产生和跃迁类型

（一）紫外-可见吸收光谱的产生

分子的紫外-可见吸收光谱是由价电子能级的跃迁而产生的，通常电子能级间隔为 1 至 20eV，这一能量恰落于紫外与可见光区。每一个电子能级之间的跃迁，都伴随分子的振动能级和转动能级的变化，因此，电子跃迁的吸收线就变成了内含有分子振动和转动精细结构的较宽的谱带。

（二）电子跃迁类型

有机化合物最主要的电子跃迁类型是：(1) 成键轨道与反键轨道之间的跃迁，即 $\sigma\to\sigma^*$，$\pi\to\pi^*$；(2) 非键电子激发到反键轨道，即 $n\to\sigma^*$，$n\to\pi^*$；(3) 电荷迁移跃迁，即在光能激发下，导致电荷从化合物的一部分迁移至另一部分。金属配合物的主要电子跃迁类型有：①配位体微扰的金属离子 d—d 电子跃迁和 f—f 电子跃迁；②电荷迁移跃迁，配合物的电荷迁移跃迁可分为：配位体→金属的电荷转移；金属→配位体的电荷转移；金属→金属间的电荷转移；③金属离子微扰的配位体内电子跃迁。表 13-1 给出了电子跃迁一览表。

表 13-1　电子跃迁一览表

化合物	跃迁类型	λ_{max}/nm	ε_{max}	溶剂
乙烷	$\sigma\to\sigma^*$	135	10000	气态
CH_3I	$n\to\sigma^*$	257.5	370	异辛烷
CH_3OH	$n\to\sigma^*$	184	150	—
乙烯	$\pi\to\pi^*$	165	10000	气态
丙酮	$\pi\to\pi^*$	166	16000	蒸气
	$n\to\sigma^*$	194	9000	—
	$n\to\pi^*$	274	13.6	—
苯	芳香族 $\pi\to\pi^*$	184	68000	己烷
	芳香族 $\pi\to\pi^*$	204	8800	—
	芳香族 $\pi\to\pi^*$	254	250	—
Cr^{3+}-EDTA	d—d	538	266	水
Fe(Ⅲ)-(8-羟基喹啉)$_3$	L→M 电荷转移跃迁	581	4000	水
Fe(Ⅱ)-(1,10-二氮杂菲)$_3$	M→L 电荷转移跃迁	510	11200	水
硅(磷砷)钼蓝	M→M 电荷转移跃迁	—	—	—
Sn(Ⅳ)-邻苯二酚紫	$\pi\to\pi^*$	555	65000	水

二、生色团和助色团

（一）生色团

早在 1876 年 Witt 就引入了生色团的概念，认为有机化合物的颜色是与化合物存在某种

基团有关，例如 —N═N— 、—N═O 等，这些基团使物质具有颜色故称为生色团。现在我们知道所谓生色团就是能在一分子中导致在（200～1000）nm 的光谱区内产生特征吸收带的具有不饱和键和未共享电子对的基团。

表 13-2，表 13-3 列举了若干孤立生色团和共轭生色团的紫外吸收光谱数据。

表 13-2 若干典型的孤立生色团的紫外吸收谱带①

生色基团	例	λ_{max}/nm	ε	溶剂	生色基团	例	λ_{max}/nm	ε	溶剂
>C═C<	$H_2C{=}CH_2$	171	15530	气体		$CH_3N{=}NCH_3$	339	5	乙醇
	$C_6H_{13}CH{=}CH_2$	177	13000	正庚烷	—N═O	C_4H_9NO	300.0	100	乙醚
—C≡CCH₃	$C_5H_{11}C{\equiv}CCH_3$	170	10000	正庚烷	$—NO_2$	CH_3NO_2	201	5000	甲醇
—C═O(酮)	CH_3COCH_3	166	16000	气体			271.0	186	乙醇
		189	900	正己烷	$—ONO_2$	$C_2H_5ONO_2$	270.0	12	二氧杂环己烷
		270.6	15.8	乙醇	—O—N═O	$C_8H_{17}ONO$	230.0	2200	己烷
—C═O(醛)	CH_3CHO	180	10000	气体	—C═N	$C_6H_5CSC_6H_5$	220.0	70	乙醚
		293.4	11.8	正己烷	—S→O	$C_6H_{11}SOCH_3$	210.0	1500	乙醇
—COOH	CH_3COOH	204.0	41	水	$—CO_2R$	$CH_3COOC_2H_5$	211	57	乙醇
$—CONH_2$	CH_3CONH_3	178	9500	正己烷					
		214	60	水	>S(→O)═O	$(CH_3)_2SO_2$	<180	—	—
—COCl	CH_3COCl	220	100	正己烷					
—N═N	CH_2N_2	≈410.0	≈1200	蒸气					

① 引自文献 1 表 1-4。

表 13-3 共轭生色基团的吸收谱带①

生色基团	化合物	π-π* 吸收带（K 吸收带）		n→π* 吸收带（R 吸收带）	
		λ_{max}/μm	ε_{max}	λ_{max}/μm	ε_{max}
C═C—C═C	1，3-丁二烯	217	21000	—	—
	2，3-丁二烯	217	20900	· ·	—
C≡C—C≡C	二甲基丁二炔	—	—	—	—
C═C—C≡C	乙烯基乙炔 ($CH_2{=}CH—C{\equiv}CH$)	219	7600	—	—
C═C—C═O	巴豆油醛 ($CH_3—CH—CH—CHO$)	218	18000	321	30
C═C—C═O	3-戊烯-2-酮 ($CH_3—CH{=}CH—C({=}O)—CH_3$)	224	9750	314	38
C═N—N═C	丁嗪	205	13000	—	—
C≡C—C—C═O	1-己炔-3-酮 ($C_3H_7—C({=}O)—C{\equiv}CH$)	214	5000	308	20
O═C—C═O	丁二酮	—	—	435	18
C═C—C(═O)—OH	顺式巴豆酸 ($CH_3—CH{=}CH—COOH$)	206	13500	242	250
—C≡C—C(═O)—OH	正丁基丙炔酸 ($C_4H_9—C{\equiv}C—COOH$)	约 210	6000	—	—
C═C—C═N	CH_3—C(H)—C═NC_4H_9	219	25000	—	—
C═C—C≡N	H H; $CH_2{=}C—CH$; CH_3	215	680	—	—
C═C—NO_2	1-硝基-丙烯 ($CH_3—CH{=}CH—NO_2$)	299	940	233	9800

续表

生色基团	化合物	π-π* 吸收带（K 吸收带）		n→π* 吸收带（R 吸收带）	
		$\lambda_{max}/\mu m$	ε_{max}	$\lambda_{max}/\mu m$	ε_{max}
HO—C(=O)—C(=O)—OH	草酸	约 185	4000	250	—
C=C—C=C—C=C	CH_2=CH—CH=CH—CH=CH_2	258	35000	—	—
C=C—C≡C—C=C	CH_2=CH—C≡C—CH=CH—CH(CH_3)—OH	257	17000	—	—
C=C—C=C—NO_2	CH_3—CH=CH—CH=CH—NO_2	298	12500	—	—

① 引自文献 1 表 1-8。

（二）助色团

助色团可分为吸电子助色团和给电子助色团。吸电子助色团是一类极性基团，给电子助色团是指带有未成键 p 电子的杂原子的基团。助色团对苯取代衍生物吸收的影响和对乙烯取代衍生物吸收的影响见表 13-4、表 13-5 和表 13-6。

表 13-4　助色团对苯取代衍生物吸收的影响①

取代基 R	E_2 带		B 带		取代基 R	E_2 带		B 带	
	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^3$	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^3$		λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^3$	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^3$
—H	204	7.9	256	0.2b	—Br	210	7.9	261	0.2b
—NO_2	269	7.8	—	—	—I	207	7.0	257	0.7b
—CH=CH_2	244	12	252	6.5b	—NH_3^+	203	7.5	254	0.2a
—CHO	244	15	280	1.5b	—N(CH_3)$_2$	251	14	298	2.1b
—$COCH_3$	240	13	278	1.1b	—SH	236	10	269	0.7c
—C≡CH	236	12.5	278	0.7c	—O^-	235	9.4	287	2.6a
—COOH	230	13	270	0.8a	—NH_2	230	8.6	280	1.4a
—CN	224	13	271	1.0a	—OCH_3	217	6.4	269	1.5a
—Cl	210	7.4	264	0.2b	—CH_3	207	7.0	261	0.2b

① 表中 a 为水溶液；b 为乙醇；c 为己烷。

表 13-5　二取代苯的吸收带（$R_1—C_6H_4—R_2$）①

取代基		对位取代		间位取代				邻位取代			
				200nm 吸收带		260nm 吸收带		200nm 吸收带		260nm 吸收带	
R_1	R_2	λ_{max}/nm	ε_{max}	λ_{max}/nm	ε_{max}	λ_{max}/nm	ε_{max}	λ_{max}/nm	ε_{max}	λ_{max}/nm	ε_{max}
CH_3	CN	237	17200	229.5	11000	276	1290	228.5	11100	276.5	1440
Cl	COOH	241	16300	231.5	9100	283	1080	229	5900	280	370
Cl	NO_2	280	10300	264	7100	313	1300	260	4000	310	1400
NO_2	CH_3	285	9250	273	7300	315	1300	266	5300	325	1300
NO_2	OH	317.5	10000	273.5	6000	333	1960	278.5	6600	351	3200
NO_2	NH_2	387	13500	280	4800	358	1450	282.5	5400	412	4500
NO_2	COOH	258.0	11000	255	3470	—	—	255	7600	—	—
NO_2	NO_2	266	14500	241.5	16300	305	1100	—			…
NH_2	COOH	284	14000	250	2400	310	650	248	3900	327	1940
NH_2	$COCH_3$	311.5	17100	—	—	—	—	—	—	—	—
NH_2	CN	270	19800	236.5	8200	308	2400	—	—	—	—
OH	CHO	283.5	16000	254.5	10100	314	2500	256	12600	324	3400
OH	COOH	255	13900	236.5	7500	296	2500	237	9000	302.5	3600
OH	$COCH_3$	275	14300	250.5	9100	308	2300	252.5	10900	324	3300

① 引自文献 1 表 1-14。

表 13-6　乙烯分子引入助色基团后 λ_{max} 的增加

取代基	NR_2	OR	SR	Cl	CH_3
吸收峰波长增加/nm	40	30	45	5	5

三、紫外吸收光谱中的一些经验规律

（一）共轭二烯类化合物的 Woodward 定则

含有不同结构的共轭二烯类化合物的紫外吸收带经验规则见表 13-7。

表 13-7 计算共轭二烯 λ_{max}的经验规则

	$\pi \to \pi^*$ λ/nm		$\pi \to \pi^*$ λ/nm		$\pi \to \pi^*$ λ/nm
直链共轭二烯基本值	217	增加一个共轭双键	30	胺基取代 —NRR′	60
同环二烯基本值	253	烷基或环残余取代	5	卤素取代	5
异环二烯基本值	214	烷氧基取代 —OR	6	酰基取代 —O—C(=O)—R	0
环外双键	5	含硫基取代 —SR	30		

在使用表 13-7 时要注意以下问题：①根据化合物结构正确选择基本值；②环外双键是指双键和环共用一个碳原子的双键，若该双键对两个环而言都是环外双键，则要算作两个环外双键；③烷基或环残余取代也会出现上述类似情况，需要重复计算；④若一个化合物中存在两个或两个以上的同环二烯结构，其基本值仍是 253nm。

Woodward 定则适于计算四个以下的共轭双键的不饱和烃的 λ_{max}，超过四个以上共轭双键的化合物则用菲斯（Fiese）和库恩（Kuhn）定则计算。

（二）菲斯和库恩定则

$$\lambda_{max}^{正己烷}/\text{nm}=114+5M+n(48.0-1.7n)-16.5R_{endo}-10R_{exo} \quad (13\text{-}1)$$

$$\varepsilon_{max}^{正己烷}/(\text{m}^2\cdot\text{mol}^{-1})=1.74\times10^4 n$$

式中 M——烷基取代基数目；

n——共轭双键数目；

R_{endo}——末端含双键的环数；

R_{exo}——环外双键数。

（三）α、β 不饱和醛或酮的 Woodward 定则

当羰基与乙烯基共轭时，$\overset{\beta}{C}=\overset{\alpha}{C}-C=O$；$\overset{\delta}{C}=\overset{\gamma}{C}-\overset{\beta}{C}=\overset{\alpha}{C}-C=O$ 其紫外吸收的经验规则见表 13-8。

表 13-8 计算共轭烯酮 λ_{max}的经验规则

	$\pi \to \pi^*$ λ/nm			
直链及六元环 α、β 不饱和酮基本值	215			
五元环 α、β 不饱和酮基本值	202			
α、β 不饱和醛基本值	207			
α、β 不饱和酸及酯基本值	193			
增加一个双键	30			
增加同环二烯	39			
环外双键，五元及七元环内双键	5			
烯基上取代	α	β	γ	δ
烷基 —R	10	12	18	18
烷氧基 —OR	35	30	17	31
羟基 —OH	35	30	50	50
酰基 —OCOR	6	6	6	6
卤素 —Cl	15	12	12	12
—Br	25	30	25	25
—SR		80		
—NR_2		95		

表 13-8 所列数值只适于乙醇溶液，若为其他溶剂，则由表 13-9 所列数据修正。

表 13-9 共轭烯酮 λ_{max}经验规则溶剂修正值

溶剂	修正值	溶剂	修正值
水	+8nm	乙醚	−7nm
甲醇	0	正己烷	−11nm
氯仿	−1nm	环己烷	−11nm
二氧六环	−5nm		

（四）奈尔西恩（Nielsen）定则

表 13-10 奈尔西恩定则

	$\pi\to\pi^*$ λ/nm		$\pi\to\pi^*$ λ/nm
α 或 β 烷基取代基本值	208	γ 或 δ 烷基取代	18
α、β 或 β、β 二烷基取代基本值	217	环外双键	5
α、β、β 三烷基取代基本值	225	五元环及七元环内双键	5
增加一个共轭双键	30		

（五）司各脱（Scott）定则

表 13-11 司各脱定则

$R_2—C_6H_4—COR_1$	E_2 吸收带波长 λ/nm	$R_2—C_6H_4—COR_1$	E_2 吸收带波长 λ/nm 邻位	间位	对位
R_1 为烷基时的基本值	246	R_2 为下列基团时：烷基或环的残余	3	3	10
R_1 为 H 时的基本值	250	—OH ， —OR	7	7	25
R_1 为 OH 时的基本值	230	$—O^-$	11	20	78
R_1 为 OR 时的基本值	230	—Cl	0	0	10
R_1 为 O—环时的基本值	230	—Br	2	2	5
R_1 为 CN 时的基本值	224	$—NH_2$	13	13	58
		—NHAc	20	20	45
		$—NR_2$	20	20	85

第二节　紫外吸收光谱数据

近年来由于其他结构分析方法的发展，紫外吸收光谱在结构分析中的地位已逐渐消退，但有机化合物的紫外吸收光谱数据在定量分析如光度分析或 HPLC 中仍是经常需要知道的数据。本节介绍一些常用的紫外吸收光谱图谱集，另外也给出一些常见有机化合物和部分天然有机化合物的紫外吸收光谱数据以供查找。

一、紫外吸收光谱图谱集

1. Sadtler Standard Ultraviolet Spectra

由美国费城 Sadtler 研究实验室编辑出版的一套光谱图集，至今已发表的谱图达 7 万张以上，并在逐年增加中。

Sadtler 光谱共分三大类：即《标准光谱》、《专用光谱》和《商品光谱》。紫外的专用光谱又有药物和生物化合物两类，紫外的商品光谱又有农用化学品和染料、颜料与染色剂等分类。

根据检索的途径不同，Sadtler 光谱的总索引共有四种：字顺索引，分子式索引，化合物分类索引和谱线位置索引。前两种索引必须知道化合物名称和分子式后才能使用，第三种是用于红外光谱，这里仅介绍谱线位置索引的使用法。

该索引用于查对未知物的紫外光谱，它是按最强峰所在位置的次序排列的（从 200nm～350nm）。如最强峰的位置相同时，则按次强峰，余类推，最多取 5 个峰。对于每一个吸收峰都用二个数字表示，前者为 λ_{max}，单位为 nm，精确到 0.5nm，后者为吸收系数 a，表示吸收

强度。峰项（Peaks）下的数字表示这个光谱的吸收峰数目。NAB 项下的字母“N”、“A”和“B”分别表示在中性、酸性和碱性条件下测得的光谱。谱线位置索引的形式见表 13-12。

表 13-12　紫外光谱的谱线位置索引

1		2		3		4		5		Peaks	IR No.	UV No.	NAB
264.0	85.24	287.0	39.34	297.5	36.06					3	7046	1985	N
264.0	62.00	293.5	45.00	227.0	41.00					3	30022	12541	B
264.0	53.00	298.0	25.00	287.0	23.00					3	7694	18361	N
264.0	97.14	301.0	54.50							2	17885	7473	B
264.0	30.00	303.0	24.50							2	41775	18901	N
264.0	41.00	305.0	28.00	350.0	23.50					3	32741	13973	A
264.0	176.0	305.0	21.00	352.0	20.10	341.0	19.50	602.2	13.50	5	30004	12524	B

2. Organic Electronic Spectral Data（有机电子光谱资料）

这是一套由许多作者共同编写的大型手册性丛书，所搜集的文献资料自 1946 年开始，目前仍在继续编写。例如：

“Organic Electronic Spectral Data”，V. 13：1971，New York，Wiley，1977.

3. Atlas of Spectral Data and Physical Constants for Organic Compounds（有机化合物光谱数据和物理常数图表）

该书由 J. M. Gasselli 主编，1973 年出版。其中收集了 15000 个化合物的光谱数据，其中也包括紫外。全书分三部分：Section A，光谱辅表；Section B，总数据表；Section C，索引。

4. Handbook of Spectroscopy（光谱学手册）

Handbook of Spectroscopy（光谱学手册）1974 年出版，共两册。该书收集了无机和有机化合物的光谱数据，也包括紫外，由 J. W. Robinson 主编。

此外还有 Kenzo Hirayama. Handbook of Ultraviolet and Visible Absorption spectra of Organic Compounds. New York：Plenum. 1967（有机化合物的紫外与可见光谱手册）和 R. A. Friedel. Ultraviolet Spectra of Aromatic Compounds. 1951（芳香族化合物的紫外光谱）。

二、部分有机化合物的紫外吸收光谱数据

表 13-13　部分有机化合物的紫外吸收光谱数据①

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}	化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
烃类				CF_2Cl_2	蒸气	197	—
甲烷		125	—			177.8	—
乙烷		135	—			153	—
环丙烷		190	—			204	—
卤代烃及卤代芳烃				CH_3Br	蒸气	175	200
CF_6	蒸气	105.5	—			165	—
CHF_3	蒸气	104.8	—		庚烷	202	264
CH_2F_2	蒸气	133.5	—	CH_2Br_2	异辛烷	220.5	1050
CH_3F	蒸气	132.5	—			198	970
CH_3Cl	蒸气	173	100		乙腈	217	1090
		160	—			195.5	990
		153	—	$CHBr_3$	异辛烷	223.4	1980
		169	370		乙腈	220.5	2020
	庚烷	173	200		异辛烷	205	1650
CH_2Cl_2	蒸气	152	—		乙腈	201	1750
		179	510	CBr_4	异辛烷	228.7	4360
$CHCl_3$	蒸气	175	—		乙腈	224	4450
		175.5	950	CH_3I	蒸气	257	230
CCl_4	蒸气	196.4	—		正己烷	258(259)	378(365)
		175.7	—		异辛烷	257.5	370
		174	2370		乙腈	251.2	370

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
CH_2I_2	蒸气	289	—
		249.1	—
	异辛烷	291.9	1270
		250.9	600
	乙腈	287.8	1240
		243.4	600
CH_2I_2	庚烷	212	1580
		240	600
		290	1300
CHI_3	异辛烷	349.4	2140
		307.2	830
		274.9	1310
	乙腈	336.4	1930
		296.1	1650
		265.1	1260
CI_4	异辛烷	387.5	1950
		305.3	1950
	二氯甲烷	383	2310
		302	2310
碘代正戊烷	环己烷	257	478
碘代正辛烷	环己烷	257	480
碘代正十二烷	环己烷	257	528
碘代正十六烷	环己烷	257	531
碘代正十八烷	环己烷	257	550
C_2H_5I	庚烷	259	444
C_3H_7I	庚烷	262	531
C_4H_9I	庚烷	269	575
氟苯	甲醇	265.5	1580
		259.5	1770
		253.5	1220
		248	630
氯苯	异辛烷	271	209
		267	141
		264	259
		260.5	177
		257	197
		251	128
		245	76.9
		217.5	8740
		214.5	10900
溴苯	甲醇	270.5	119
		264	171
		260.5	173
		257	159
		250	139
碘苯	甲醇	250	732
		225.5	11700
C_6H_5—CH_2Cl	甲醇	265	211
		259	231
		253.5	190
		216.5	6970
烯烃			
乙烯	蒸气	162	1000
2-甲基-1,3-丁二烯	甲醇	222.5	10800
2,4-己二烯	甲醇	227	14200
2,5-二甲基-2,4-己二烯	甲醇	241.5	13100
C_6H_9—C_6H_9	甲醇	238.5	13800
1,3-环己烯	甲醇	223.5	9810
2,3-二甲基-1,3-丁二烯	环己烷	226	21400
1,3-丁二烯	己烷	217	21000

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
$H(CH=CH)_nH$			
$n=1$	蒸气	171	15530
$n=2$	己烷	271	21000
$n=2$	蒸气	210	
$n=3$	异辛烷	268	43000
$n=4$	环己烷	304	
$n=5$	异辛烷	334	121000
$n=6$	异辛烷	364	138000
$n=7$	异辛烷	390	
顺 2-丁烯	蒸气	174	
反 2-丁烯	蒸气	178	13000
1-己烯	蒸气	177	12000
	庚烷	180	12500
丙二烯	—	181	20000
1-硝基-1-丙烯	乙醇	229	9400
环己烯	蒸气	176	5000
	环己烷	183.5	6800
胆甾-4-烯	环己烷	193	10000
1,5-己二烯	蒸气	178	26000
$CH_3(CH=CH)_nCH_3$			
$n=2$	环己烷	227	24000
$n=3$	己烷	263	45000
	氯仿	279	33400
$n=4$	己烷	299	80000
$n=4$	氯仿	317	
$n=5$	己烷	326	122000
	氯仿	349	
$n=6$	石油醚	352	
	氯仿	380	146500
环戊二烯	己烷	191	3000
		239	3000
大环多烯类			
$(CH_2=CH)_n$			
八环 $n=4$	异辛烷	245	650
十二环 $n=6$	异辛烷	300	—
十四环 $n=7$	异辛烷	317	70000
		376	5800
十六环 $n=8$	异辛烷	285	70000
十八环 $n=9$	异辛烷	278	8000
		369	30000
二十环 $n=10$	异辛烷	267	—
		287	—
		297	—
		375	—
		395	—
二十四环 $n=12$	异辛烷	264	12000
		350	200000
		363	200000
三十环 $n=15$	异辛烷	329	44000
叠烯化合物			
$CH_2=C=CH_2$		181	20000
		188	4000
		227	630
$CH_2=C=C=CH_2$	乙醇	241	20300
		310	4150
$(CH_3)_2C=C=C=CH_2$	己烷	220	3500
		254	13000
		294	700
$(CH_3)_2C=C=C=(CH_3)_2$	己烷	230	7000
		263	17000

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
=C=C=	乙醚	230	9100
		272	[illegible]
$(CH_3)_2C{=}C{=}C{=}C{=}C(CH_3)_2$	己烷	214	
		250	—
多炔类			
$CH_3(C{\equiv}C)_nCH_3$			
$n=1$	蒸气	172	45000
	乙醇	227	370
		236.5	390
$n=2$	乙醇	218.5	300
		226.5	360
		236	330
		250	160
$n=3$	乙醇	207	14000
		239	105
		253	130
		268	200
		286	200
		306	120
$n=4$	乙醇	204	24300
		214.5	91500
		226	19800
		234.5	28100
		268	125
		286	140
		306	180
		328	180
		354	105
$CH_2{=}C{=}CH\cdot C{\equiv}CH$	乙醇	212	11000
$HOCH_2CH_2CH{=}C{=}CH\cdot C{\equiv}CH$	乙醇	216	11700
$HOCH_2CH_2CH{=}C{=}CH{\equiv}CC_2H_5$	乙醇	221	14000
CH_3 CH_3 $CH{=}C\cdot COCH_3$ CH_3 CH_3		228	11600
		278	4500
$C_6H_8CH{=}CH_2$	正庚烷	177	13000
$C_5H_{11}{\equiv}CCCH_3$	正庚烷	178	10000
苯及其衍生物			
苯	己烷	184(187)	68000
		204	8800
		254(255)	250
	水	180	55000
		203.5	7000
		254(256)	205
	庚烷	184	60000
		204	8000
		255	200
	异辛烷	254	190
甲苯	己烷	189	55000
		208	7900
		262	260
	水	206	7000
		261	225
	95%乙醇	208	7800
		260	220
叔丁基苯	乙醇	207.5	7800
		257	170
正丁基苯	异辛烷	262	2.1×10^2

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
邻二甲苯	25%乙醇	210	8300
		262	300
间二甲苯	25%乙醇	212	7300
		264	300
对二甲苯	乙醇	216	7600
		274	620
1,3,5-三甲苯	乙醇	215	7500
		265	220
	烃	266	305
三亚苯	95%乙醇	257	150000
		273	25000
		333	760
联苯	己烷	240	3.1×10^4
	二氯甲烷	250	1.9×10^4
	石油醚	247	1.6×10^4
	氯仿+乙醇(1+1)	251	2×10^4
	环己烷	247	1.9×10^4
	乙醇	246	2×10^4
		248	1.4×10^4
2-甲基联苯	正己烷	237	10500
2-乙基联苯		233	900
2,2′-二甲基联苯	己烷	198	43000
		228	6000
		264	800
4,4′-二甲基联苯	正己烷	256.5	22500
2,2′-二乙基联苯	正己烷	227(sh)	6000
		263.5	730
		271	640
2,2′-二异丙基联苯	正己烷	227(sh)	5500
		258(sh)	650
		263.5	720
		271	560
2,2′-二叔丁基联苯	正己烷	258(sh)	380
		263.5	430
		270	530
联苯酰	乙醇	259	1.7×10^4
多联苯			
$[(HC_6H_4)_nH]$			
$n=2$ 对位	—	251.5	18300
间位	—	251.5	18300
$n=3$ 对位	—	280	25000
间位	—	251.5	44000
$n=4$ 对位	—	300	29000
$n=5$ 对位	—	310	62500
$n=6$ 对位	—	317.5	56000
$n=9$ 间位	—	253	184000
$n=10$ 间位	—	253	213000
$n=11$ 间位	—	253	215000
$n=12$ 间位	—	253	233000
苯乙烯	己烷	248	15000
		282	740
	乙醇	244	12000
		282	450
芪(1,2-二苯乙烯)顺式	乙醇	225	24000
		274	10000
		283	12300
反式	庚烷	202	24000
		228	16000
		296	28000
苯乙炔	正己烷	202	44000

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
苯乙炔	正己烷	236	12500
		278	650
1-苯基-1,3-丁二烯(反)	—	280	28300
(顺)		265	14000
α-水芹烯($C_{10}H_{16}$)	—	263	2500
β-水芹烯	—	231	9000
1-苯基丁二烯(顺)		265	14000
(反)		280	28300
均二苯代乙烯(顺)		280	10500
(反)		295.5	29000
α-甲基均二苯代乙烯(顺)		260	11900
(反)		270	20100
$C_6H_5(CH=CH)_nC_6H_5$			
$n=1$	苯	306	24400
$n=2$	苯	334	40000
$n=3$	苯	358	75000
$n=4$	苯	384	86000
1,2,4,5-二苯并环戊烯		280	69180
		350	6030
		395	12020
二苯甲烷	乙醇	220	10000
		262	500
	异辛烷	263	4.4×10^2
稠环芳烃			
萘	异辛烷	221	110000
		275	5600
		311	250
	乙醇	315	
蒽	异辛烷	251	200000
		376	5000
	乙醇	252	1.7×10^5
		357	8000
丁省	庚烷	272	180000
		473	12500
戊省	庚烷	310	300000
		585	12000
菲	甲醇	219	18000
		251	90000
		292	20000
		330	350
1,2-苯并丁省	苯(乙醇)	258	50000
		306	102000
6,10-二甲苯-1,2-苯并蒽	己烷	285	6.7×10^4
1,2,5,6-二苯蒽	1,4-氧杂环己烷	223	40000
		299	160000
		335	17000
		394	1000
䓛	95%乙醇	220	37000
		267	160000
		306	15500
		360	1000
苝	苯	287	97700
		329	22900
		376	850
1,2-二氢化茚	甲醇	272.5	1230
		266	1140
		259.5	769
1,2,3,4-四氢萘	甲醇	273.5	724
		266.5	669
		213	10200
茚	甲醇	289.5	211
		280	944
		247.5	17300
苊	甲醇	320	1430
		313.5	856
		306	2400
		300	3470
		288	5540
		278.5	4930
		243	1100
		227	73100
芴	甲醇	299	9680
		288	6380
		260	21200
		219	16600
芘	甲醇	333.5	29400
		318	17600
		305	6910
		294	2680
		271.5	49800
		261	24400
		251	11800
		239.5	85100
		230.5	43400
醇类及酚类			
甲醇	蒸气	183.5	150
		174.2	356
乙醇	蒸气	181.5	320
		174	670
丙醇	己烷	184	158
异丙醇		181	620
水		167	1480
		167	2120
烯丙醇	己烷	189	7600
苄醇	乙醇	258	1.9×10^2
$CH_2=C=CH-CH=CH\cdot CH_2CH_2OH$(反)	乙醇	218	10000
		224	10000
麦角甾烯醇	无水乙醇	271.5	11500
		282	12150
		293.5	6900
	二氯乙烷	273.5	10800
		283.5	10450
		295.5	6650
	氯仿	274.5	10000
		284.5	10850
		296	6600
	环己烷	271.5	11200
		282	11900
		294	6780
$CH_2OH-C_6H_4-CH_2OH$	甲醇	271.5	151
		262	265
		218	8700
$CH_2OH-C_6H_4-O-CH_3$	甲醇	275.9	1780
		270.5	1830
		220	6530
$CH_2OH-C_6H_4-NO_2$	甲醇	260	5800
$O_2N-C_6H_4-CH_2OH$	甲醇	252	7210
$O_2N-C_6H_4-CH_2OH$	甲醇	270.5	8790
		214	6650

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
苯酚	环己烷	276.5	2340
		270	2690
		264	1630
	水	210.5	6200
		270	1450
	0.1mol/L NaOH	235.5	9400
		288.5	2600
邻甲酚	甲醇	272.5	1820
		214	6030
	甲醇 KOH	282	1990
		235	5510
间甲酚	甲醇	273	1570
对甲酚	甲醇	278	1950
邻氯酚	环己烷	281	2440
		273.5	2350
对氯酚	甲醇	284	1810
		228	9260
间氨基酚	甲醇	287	2090
邻硝基酚	甲醇	345	3330
		272	6300
	甲醇 KOH	408	4870
		276	3990
		230	16900
间硝基酚	甲醇	330	2020
		268.5	5980
		229	9600
对硝基酚	甲醇	311	11000
		228	7510
	甲醇 KOH	390	18200
		300	1260
		290	1296
		224	6840
2-萘酚	甲醇	330	1870
		285	3030
		273.5	4250
		263.5	3680
		225	75800
1-萘酚	甲醇	323	2950
		308.5	3840
		295.5	4800
		233	32300
OH, OH	甲醇	336	2570
		286.5	4880
		235	46900
		214	30700
OH, OH	甲醇	330	8300
		316	8100
		298	9560
		225	98200
OH, OH	甲醇	328	3080
		319.5	1940
		313	2400
		285	3360
		231	75800
五氯酚	碱性液	320	6.9×10^3
百里酚	碱性液	294	—
间甲氧甲酚	碱性液	291	—
邻溴酚	碱性液	292	—
4-氯-2-甲酚	碱性液	297	—
4-氯-3,5-二甲酚	碱性液	269	—
2,4-二氯酚	碱性液	304	—
2,3-二甲酚	0.4mol·L^{-1} NaOH	239	8295
		288	1260
2,5-二甲酚	0.4mol·L^{-1} NaOH	239	7733
		290.5	1002
2,4-二甲酚	0.4mol·L^{-1} NaOH	296	2811
3,4-二甲酚	0.4mol·L^{-1} NaOH	294	2432
3,5-二甲酚	0.4mol·L^{-1} NaOH	290	2292
2-氯-4-苯基酚	碱性液	290	—
苯硫酚	0.4mol·L^{-1} NaOH	265	14000
		239	8054
		290	2358
对甲苯硫酚	0.4mol·L^{-1} NaOH	265	15053
		239	9018
		290	2310
醚类			
甲醚		183	
		168	
		160	
		184	252
		162.5	400
乙醚		188.3	199
		176.5	401
四氢呋喃		190	560
		172	3000
四氢吡喃		189	560
		175	3000
二噁烷(二氧杂环己烷)		175	10000
二乙烯醚	蒸气	203.5	15000
		202	1560
		164	658
环氧丙烷		181.5	276
		175	200
环氧乙烷		171	3720
茴香醚(苯甲醚)	已烷	280	2.5×10^3
	水	217	6400
		269	1500
苯醚	环己烷	255	11000
		272	2000
二苯醚	环己烷	226	112200
		273	2042
$-CH_2-O-CH_2-$	环己烷	264	312
		258	393
		252	353
$-O-CH_3$, $-CH_3$	甲醇	278	1620
		271.5	1750
		216	6270
$-O-CH_3$, CH_3	甲醇	279	1430
		272	1510
		216.5	6590
OCH_3, CH_3	甲醇	284.5	1540
		278	1850
-O- -O-	甲醇	277	3270
		270	3280

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
醛类			
甲醛	蒸气	175	18000
		304	18
	异戊烷	310	5
乙醛	蒸气	182	10000
		289	12.5
	异辛烷	290	17
丙醛	异辛烷	292	21
异丁醛	己烷	290	16
邻甲基苯甲醛	甲醇	280	872
		249	4550
间甲基苯甲醛	甲醇	289	1330
		249	10100
邻氯苯甲醛	环己烷	304	1390
		302	1380
		293.5	1780
		246	11000
间氯苯甲醛	甲醇	289.5	854
		243	7160
间硝基苯甲醛	水	232	20900
对硝基苯甲醛	甲醇	265	10600
$CH_2{=}CH{-}CH_2{-}O{-}C_6H_4{-}CHO$ [structure]	甲醇	282	17600
		276	17800
		220	12700
3,4-二氯苯甲醛	甲醇	289.5	483
		280	609
		271.5	507
[fluorene–CHO structure]	甲醇	315	27800
[pyrene–CHO structure]	甲醇	394	15600
		363	28100
		287	39100
		242	42000
		232	54100
苯甲醛	己烷	242	14000
		280	1400
		328	55
	乙醇	244	15000
		280	1500
		328	20
2,4-二羟基苯甲醛	乙醇	318	8.2×10^3
	0.2% KOH 乙醇溶液	334	3.1×10^4
丙烯醛	水	220	5.5×10^3
	己烷	210	1.6×10^4
香草醛	0.2% NaOH 的乙醇溶液	353	1.4×10^4
	乙醇	310	1.1×10^4
糠醛	水	278	
丙炔醛	—	328	13
巴豆醛	—	321	19
[illegible]		290	11
2-乙基-己-2-烯-1-醛	—	313	27
柠檬醛	—	324	65
β-环柠檬醛	—	328	43
羟甲基糠醛(HMF)	0.1% $NaHSO_3$	284	

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
多烯醛			
$[CH_3(-CH{=}CH)_n-CHO]$			
$n=1$	乙醇	217	15650
$n=2$	乙醇	270	27000
	己烷	261	25000
		340	43
$n=3$	己烷	312	40000
$n=4$	己烷	343	40000
$n=5$	己烷	370	57000
		377	51000
$n=6$	己烷	393	65000
$C_6H_5(CH{=}CH)_nCHO$			
$n=0$	甲醇	244	12000
$n=1$	甲醇	285	25000
$n=2$	甲醇	323	43000
$n=3$	甲醇	355	54000
$n=4$	甲醇	382	51000
[furan ring]$-(CH{-}CH)_nCHO$			
$n=0$	乙醇	254	
$n=1$	己烷	306	
	乙醇	300	21700
$n=2$	己烷	337	
	乙醇	320	34800
$n=3$	己烷	357	
	乙醇	353	39100
$CH_2{=}CH{-}CH{=}O$	乙醇	207	11200
$CH_3CH{=}CH{-}CH{=}O$	乙醇	217	17900
$CH_2{=}C(CH_3){-}CHO$	乙醇	216	11000
$CH_3CH{=}C(CH_3){-}CHO$	乙醇	226	16100
$(CH_3)_2C{=}C(CH_3){-}CHO$	乙醇	245	13000
[cyclohexylidene]$=CHCHO$	乙醇	238	16000
[cyclic structure]–CHO	乙醇	240	8000
[cyclic structure]–CHO	乙醇	235	1400
$(CH_2)_2C{=}C{-}C{-}CHCHO$	甲醇	292	
酮类			
丙酮	蒸气	195	9000
		274	13.6
	环己烷	190	1000
		275	22
	异辛烷	279	13
丙酮	水	270	17.6
	乙醇	271	16
甲乙酮	异辛烷	279	16
二异丁酮	异辛烷	288	24
六甲基丁酮	乙醇	295	20

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
丁酮	异辛烷	278	17
2-戊酮	己烷	278	15
4-甲基-2-戊酮	异辛烷	283	20
环丁酮	异辛烷	281	20
环戊酮	异辛烷	300	18
	己烷	299	20
环己酮	异辛烷	291	15
	己烷	285	14
环庚酮	异辛烷	292	17
环辛酮	异辛烷	291	14
环壬酮	异辛烷	293	15
环癸酮	异辛烷	288	15
乙酰丙酮	0.1mol/L NaOH溶液	292	1.6×10^4
	乙醇	272	7.9×10^3
	水	277	1900
	己烷	269	12100
$CH_3-C(=O)-CH=CH_2$		219 324	
4-庚酮	乙醇	281	27
二苯甲酮	己烷	250	2×10^4
	乙醇	330	1.6×10^2
樟脑(2-莰酮)	己烷	295	14
甲基乙烯基甲酮		324	24
2-乙基-己-1-烯-3-酮		320	26
甲基异丙烯基-酮		319	27
亚乙基丙酮		314	38
鸢尾酮		308	100
亚异丙基丙酮		314	60
雪松酮		326	27
$CH_3-C(=O)-SH$	环己烷	219	2200
$CH_3-C(=O)-Cl$	庚烷	240	34
$CH_3-C(=O)-Br$	庚烷	250	90
$CH_3-C(=O)-O-C(=O)-CH_3$	异辛烷	225	47
异亚丙基丙酮	—	235	—
$CH_3-C(CH_3)=CH-C(=O)-CH_3$			
野菊酮	2,4-二硝基苯腙的乙醇液	360	
苏拉明($C_{13}H_{22}O$)	正己烷	230	11750
α、β-不饱和酮			
$CH_2=C(CH_3)-COCH_3$	乙醇	221	6450
$CH_3-CH=CHCOCH_3$	乙醇	224	9750
$(CH_3)_2C=CHCOCH_3$	乙醇	235	14000
$(CH_3)_2C=C(CH_3)COCH_3$	乙醇	246	6000
2-环己亚基环己酮(结构式)	乙醇	258	6000

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
2-环戊亚基环戊酮(结构式)	乙醇	259	10790
酸类			
乙酸	95%乙醇	204	41
乙酸酐	异辛烷	225	47
苯甲酸	水	230	10000
		270	800
苯甲酸盐	乙醇	228	15000
		272	850
	环己烷	232	12000
	石油醚	225	—
邻氨基苯甲酸	乙醇	219	36000
对硝基苯甲酸	—	258	11000
间硝基苯甲酸	—	255	7600
邻酸基苯甲酸	—	255	3470
肉桂酸			
顺式	己烷	200	31000
		215	17000
		280	25000
反式	己烷	204	36000
		215	35000
		283	56000
	乙醇	215	19000
		268	20000
五棓子酸	0.01 $mol\cdot L^{-1}$ HCl	270	9.8×10^3
	0.01 $mol\cdot L^{-1}$ HCl	274	
	0.2 $mol\cdot L^{-1}$ KOH	289	
	乙醇溶液	277	3.7×10^3
山梨酸盐	石油醚	250	—
山梨酸	石油醚+乙醚(1+1)	250	—
顺,反-β-甲基山梨酸	甲醇	255	17600
脱氢乙酸	酸性液	307	
β-环牦牛儿酸		206	3400
2,6,6-三甲基环己烯甲酸(结构式,H_3C、CH_3、COOH、CH_3)	0.1 $mol\cdot L^{-1}$ HCl	210	—
烯酸			
$CH_2=CH-COOH$	乙醇	200	10000
$CH_2=C(CH_3)-COOH$	乙醇	210	—
2-噻吩基-CH=C-COOH(结构式)	乙醇	220	14000
2-噻吩基-CH=C(CN)-COOH(结构式)	乙醇	235	12500
$CH_3-CH=CH-COOH$			
(反)	乙醇	204	11700
(顺)	己烷	208	12500
$CH_3-(CH=CH)_2-COOH$	乙醇	254	24800
	己烷	261	2000
$CH_3-(CH=CH)_3-COOH$	乙醇	294	36500
	己烷	303	3650

续表

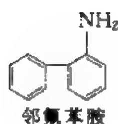
化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
$CH_3-(CH=CH)_4-COOH$	乙醇	332 327	49000 4870
二烯酸	异辛烷	233	
三烯酸	异辛烷	262 268 274	— — —
四烯酸	异辛烷	308 315 322	3
五烯酸	异辛烷	346	—
尿酸	0.5%碳酸锂液	294	—
丁烯二酸(顺)	—	198	26000
(反)		214	34000
$CH_2=C=CH-COOH$	—	200 247	8000 250
$CH_3CH=C=CHCOOH$	—	203 262	11000 200
O —$(CH=CH)_n$—COOH			
$n=0$	二氧六环	270	—
$n=1$	二氧六环	311	26500
$n=2$	二氧六环	346	29500
$n=3$	二氧六环	366	37000
$n=4$	二氧六环	389	49000
$CH_2=CH-COOH$	乙醇	200	10000
$CH_2=C(CH_3)-COOH$	乙醇	210	—
$CH_2COOH-C(=CH_2)-COOH$	乙醇	206	8000
反 $CH_3CH=C(CH_3)-COOH$	乙醇	213	12500
顺 $CH_3CH=C(CH_3)COOH$	乙醇	216	9000
$(CH_3)_2C=CHCOOH$	乙醇	216	12000
$(CH_3)_2C=C(CH_3)COOH$	乙醇	221	9700
$(CH_3)(C_2H_5)C=C(CH_2COOH)-COOC_2H_5$	乙醇	219	9200
—COOH	乙醇	222	10500
COOH	乙醇	217	10000
COOH	乙醇	222	9900
COOH	乙醇	231	10500
$COOCH_3$ COOH	乙醇	228	10000
COOH	乙醇	206	3400
CHCOOH	乙醇	220	14000
=CHCOOH	乙醇	224	—
CN, —C—COOH	乙醇	235	12500
COOH	乙醇	236	2100
$CH_3\overset{O}{\overset{\Vert}{C}}O$ COOH C	乙醇	228	11600
$CH_3OOCCH \overset{反}{=} CH-CH \overset{反}{=} CHCOOH$	乙醇	257	29400
$CH_3CH \overset{反}{=} CH-CH \overset{顺}{=} CHCOOH$	乙醇	260	16200
$CH_3CH \overset{反}{=} CH-CH \overset{反}{=} CHCOOH$	乙醇	263	25800
$CH_3OOC-C(CH_3)=CH-CH=CH-CH=C(CH_3)COOH$	乙醇	315	44000
酯类			
乙酸甲酯	异辛烷	210	57
乙酸乙酯	水 95%乙醇 异辛烷 石油醚	204 208 211 207	60 58 58 69
丁烯二酸二甲酯(反式) (顺式)	—	214 198	34000 26000
$-O-\overset{O}{\overset{\Vert}{C}}-CH_3$	—	261	230
丙烯酸乙酯(EA)	环己烷	240	—
乙酰乙酸乙酯(酮式)	水	272	16
(醇式)	己烷或三甲基戊烷	243	16000
$COOC_2H_5$ O	乙醇	248	12500
$CH_3-C(NH_2)=CHCOOC_2H_5$	环己烷	268	16200
$CH_3C(NHCH_3)=CHCOOC_2H_5$	环己烷	283	17800
$CH_3C[N(CH_3)_2]=CHCOOC_2H_5$	环己烷	275	21400
$C_2H_5CCNH_2=CHCOOC_2H_5$	环己烷	254	12900

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
$(EtO)_2C═CHCOOC_2H_5$	环己烷	234	14500
共轭不饱和γ和σ内酯	乙醇	220	7500
		225	5000
		235	900
	乙醇	220	5700
		225	4450
		230	3100
	乙醇	217±5	10000～20000
	乙醇	215～230	—
	乙醇	217	—
CH_2OH	乙醇	217	—
酰胺类			
苯甲酰胺	甲醇	267.5	691
		224.5	11000
间甲基苯甲酰胺	甲醇	276	949
		229	10500
对甲基苯甲酰胺	甲醇	234.5	14000
邻溴苯甲酰胺	甲醇	266.5	406
对硝基苯甲酰胺	甲醇	260	11300
邻羟基苯甲酰胺	甲醇	302	3810
		234.5	7120
	甲醇	329	5690
	KOH	242.5	7050
		214	33000
$C_6H_5-CH(CH_3)-NH-CHO$	甲醇	263.5	175
		257.5	206
		251.5	176
		247	143
$C_6H_5-CH_2CH_2-NH-CO-CH_3$	二氧六环	268	107
		264	117
		258.4	150
		253.5	127
$C_6H_5-CH(CH_3)-NH-CO-CH_3$	甲醇	263.5	144
		257	193
		251.5	183
		246.5	136
$CH_3CH_2-CO-NH-C_6H_5$	甲醇	242	15700
N-乙酰苯胺	乙醇	241	1.4×10^4
乙酰胺 (CH_3CONH_2)	正己烷	178	9500
	水	214	60
	甲醇	205	160

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
六素精(三次甲基三硝基胺)	乙醇	213	1.1×10^4
苯酰乙酰替苯胺			
酮式	—	245	—
醇式	—	308	—
	强碱中	323	—
2-仲丁基-4,6-二硝基-N-(α-苯基乙基)-苯胺	环己烷	(D-)335	—
		(L-)336	—
α,β-不饱和酰胺和内酰胺	水	213	7000
NH_2			
$CONH_2$	乙醇	220	—
$CONH_2$	乙醇	213	—
$C(=O)-NH_2$	乙醇	218	—
NH_2	水	200	4660
N-H	甲醇	204	8400
		240	1200
N-H	乙醇	241	1470
$N-CH_3$	乙醇	251	1120
硝基化合物			
硝基苯	正己烷	252	10000
		282	1000
		330	125
1,2-二硝基苯	乙醇	212	1.3×10^4
1,3-二硝基苯	乙醇	235	1.7×10^4
1,4-二硝基苯	乙醇	260	1.4×10^4
2,4-二硝基甲苯	乙醇	239	1.4×10^4
硝基苯	己烷	330	125
		280	1000
		330	140
		252	10000
硝基甲烷	己烷	202	4.4×10^4
		279	15.8
硝基甲烷	乙醇	271	186
	甲醇	201	5000
	庚烷	275	15
2-甲基-2-硝基丙烷	庚烷	280.5	23
硝酸辛酯	戊烷	270	15
硝酸环己酯	—	270	22
亚硝酸辛酯	己烷	230	2200
硝酸乙酯	二氧杂环己烷	270	12

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
亚硝酸丁酯	乙醇	222	1700
	乙醇	357	45
胺类			
甲胺	蒸气	173.4	2200
		215	600
二甲胺	蒸气	190.5	3300
		220	100
三甲胺	蒸气	199	3950
		227.3	900
三乙胺	—	212	6100
苯胺	异辛烷	233	8×10^3
		285	1.8×10^3
	水	230	8600
		280	1430
	醚	203	7500
		254	160
	甲醇	230	7000
		280	1320
邻甲苯胺	环己烷	285	3150
		233	11800
间甲苯胺	甲醇	286	1460
		236	8900
	甲醇 HCl	267.5	256
		260.5	283
对甲苯胺	环己烷	294	1900
		291	1930
		288	1850
		237	9700
	甲醇	300	3190
		223.5	22400
邻氟苯胺	甲醇	392	31
		282	1900
		232	9410
	甲醇 HCl	265	752
		259.5	829
		255	634
间氟苯胺	甲醇	283.5	1800
		236.5	10100
	甲醇 HCl	264.5	855
		258.5	862
		253.5	689
		204	6670
对氟苯胺	甲醇	290	1730
		229.5	6100
	甲醇 HCl	267	911
		261	1020
		256	819
邻氯苯胺	环己烷	290	3030
		236.5	10900
间氯苯胺	甲醇	294	1970
		242	8700
对氯苯胺	甲醇	296	16300
		243	12400
邻溴苯胺	甲醇	293	2720
		236.5	7750
	甲醇 HCl	292	135
		270.5	175
		260	234
间溴苯胺	甲醇	292	4770
		239.5	14900
间溴苯胺	甲醇 HCl	272.5	256
		265.5	276
		256	248
		250.5	262
对溴苯胺	甲醇	296.5	1460
		244.5	12600
邻碘苯胺	甲醇	296	2770
		238	7960
		211	29700
	甲醇 HCl	230	10600
间碘苯胺	甲醇	295	2210
		243	8150
		215	33700
	甲醇 HCl	232.5	11800
对碘苯胺	甲醇	296	1790
		249	14600
	甲醇 HCl	232	10300
苄胺	异辛烷	260	2500
2,4-二硝基苯胺	乙醇	236	15000
		349	17000
邻苯二胺	甲醇	293.5	3220
		282	2730
		238	6020
	甲醇 HCl	285.5	2510
		275.5	2790
		269	2400
		235	7870
间苯二胺	甲醇	293.5	2310
对苯二胺	甲醇	308	1830
		243	11200
1-萘胺	环己烷	318	5100
		243	26600
		212.5	43500
N-甲基苯胺	甲醇	294	1890
		245	11100
N-环己烷苯胺	甲醇	297	1680
		249	11300
二苯胺	环己烷	281	8240
N-甲基-1-萘胺	甲醇	416	102
		332	6620
		248	16900
		212	49000
	甲醇 HCl	504	156
		316	9580
		311	11100
		279	539
		221	82100
N,*N*-二甲基苯胺	甲醇	298	2290
		251	11600
	甲醇 HCl	263	144
		259.5	209
		253.5	276
		248	272
三苯胺	甲醇	296.5	24800
N,*N*-二甲基-1-萘胺	甲醇	302	4950
		215.5	54600
	甲醇 HCl	316.5	383
		311	416
		279.5	6350
		270.5	5700
		221	93600

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
对硝基苯胺		318	13500
间硝基苯胺		280	4800
邻硝基苯胺		282.5	5400
2-氨基联苯	乙醇	224	1.9×10^4
4-氨基联苯	乙醇	275	1.6×10^4
不饱和含氮化物			
$CH_2=CH-N(C_4H_9)(C_2H_5)$	己烷	231	4200
$CH_3C=CH-N\langle$ (ring)	己烷	234	4890
$(CH_3)_3C-CH=N-C_4H_9$	己烷 乙醇	244 235	85 107
$CH_3CH=N-C_6H_7$		170	8000
⬡—N—N—⬡	环己烷	245	89
$[C_4H_9-N=C(CH_3)]_2$	乙醇	206	17000
$[CH_3CH=N-]_2$	乙醇	208	10000
$CH_3CH=CH-CH=N-CH_3$	乙醇	220	33000
$(CH_3)_2C=N-NH-CH_3$	己烷	230	1400
$CH_3CH_2HC=N-N(CH_3)_2$	己烷	240	7000
$(CH_3)_2C=N-N(C_2H_5)_2$	己烷	210	3000
	己烷	275	520
	乙醇	265	470
$CH_3-N=N-C(CH_3)_2$	己烷	360	15
$(CH_3)_2C-N=N-C(CH_3)_2$	己烷	390	13
	乙醇	355	20
	蒸气	354	—
	蒸气	234	60
	蒸气	196	3200
	蒸气	163	7300
5,5-二甲基-Δ'-吡唑啉	蒸气	324	
	庚烷	325	450
	乙醇	322	200
H_3C, CH_3 / C / N, CH / N, CCH_3 (ring)	己烷 己烷 乙醇 乙醇	359 248 345 257	230 2350 210 2200
乙基叠氮化物	乙醇	222 287	150 20
	庚烷	255	9350
乙基重氮乙酸盐	庚烷	389 249	14 11500
	甲醇	375	16.5
$CH_3-CH=CH-CH=N-C_4H_9$	乙醇	220	23000
$>C=C-\cdots-C=\overset{+}{N}<$	乙醇	274—278	20000
CH_3O (ring) $=\overset{+}{N}$ ClO_4^-	乙醇	286	24300
$>N$ (chain) $=N$ (ring) I^-	乙醇	328	48700
$CH_2-CH-CH-CH-NOH$	乙醇	230	17800
$CH_2-CH-C-C-NOH$ (CH_3CH_3)	乙醇	230	16900
$C_4H_9-N=C-C=N-C_4H_9$ (CH_3CH_3)	乙醇	209	18500
$CH_3CH=CH-CH=N-$ $N=CHCH=CHCH_3$	乙醇	275 283	38900 36300
$(CH_3)_2C=N-$ $N=C(CH_3)_2$	乙醇	205 227 287	18000 5000 105
$CH_2=CHCN$	乙醇	203	10000
(ring) —CN, N	乙醇	213	10000
(ring) CN, N	乙醇 酸溶液	278 216 272	18300 2400 1300
$CH_2=CH-CH=CHCN$	甲醇	241	18600
$(CH_3)_2C=CH-N=N-CH_3$	乙醇	252	7490
$CH_3CH=C(CH_3)N=NCH_3$	乙醇	248	3300
$CH_3CH=CH-NO_2$	庚烷	237 312	10000 33
$CH_3CH=CH-CH=CHNO_2$	乙醇	226 298	5500 10000
硫化物			
C_2H_5SH	乙醇	193 225	1350 160
n-C_3H_7SH	乙醇	225	160
二甲硫(甲硫醚)	乙醇	210 229	1020 140
二乙硫(乙硫醚)	乙醇	210 229	180 140
二乙硫	己烷 己烷	494 215	4600 1600
二丁硫	乙醇	210	1200
二丁基二硫	乙醇	201 215	2089 398
	环己烷	224	126
1-己硫醇	0.4 mol/L	239	4484
	NaOH	265	673
亚丙基硫环	异辛烷	218 275	600 30
亚丁基硫环	异辛烷 乙醇	219 240	800 50
亚戊基硫环	乙醇	210 229	770 177
二甲二硫	乙醇	195 253	400 290
1,3-亚丙基二硫	乙醇	333	148
1,4-亚丁基二硫	乙醇	292	300
1,3-亚丙基三硫	乙醇	211	9500
		253	390
		290	315
硫己环	乙醇	199 211 233	2610 1570 116
1,4-二硫己烷	乙醇	196 225	5850 350
1,3-二硫己烷	乙醇	188 230 248	3790 360 528
1,3,6-三硫己环	乙醇	204 239.5	6600 1250

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
二苯甲硫酮	乙醚	220	70
$(C_6H_5)_2CS$	乙醇	315	15100
苯甲砜	乙醇	217 264	6700 980
二苯砜	乙醇	235 266	17400 2140
二烯丙基亚砜	乙醇	210～215	1500
二苯乙砜	乙醇	233 265	14100 2140
二硫化碳	CCl_4	315	—
$C_5H_{11}SOCH_3$	乙醇	210	1500
乙烯硫醚	乙醇	255	5600
叔丁硫醇	0.4mol/L NaOH	243 265	1260
二氧化硫脲(TD)	水	269	—
$CH_3-C(=S)-NH_2$	—	358	17.8
$NH_2-C(=S)-NH_2$	—	291	71
(环状亚砜结构 S=O)	—	238	2535
吡啶及衍生物			
吡啶	水	253	3600
	己烷	252	2080
	碱液	257	2750
	酸液	256	5300
2-CH_3	碱液	262	3560
	酸液	262.5	6600
3-CH_3	碱液	263	3110
	酸液	262.5	5500
4-CH_3	碱液	255	2100
	酸液	252.5	4500
2-F	碱液	257	3350
	酸液	260	5900
2-Cl	碱液	263	3650
	酸液	269	7200
2-Br	碱液	265	3750
	酸液	272	7600
2-I	碱液	272	4000
	酸液	290	8300
2-OH	碱液	230 295	10000 6300
	酸液	225 295	7000 5700
3-SH	碱液	255 310	7800 3200
	酸液	268 313	13600 2600
N-甲基哌啶（结构式，N-CH_3）	乙醇	213	1600
1,1′-联吡啶	己烷	280	1.6×10^4
2-氨基吡啶	异辛烷	230	1×10^4
五元杂环芳香族及其衍生物			
环戊二烯	己烷	230 238.5	2500 3400
呋喃（结构式）	蒸气	204 251	6500 1
2-醛基呋喃	—	227 271	1100 13000
2-乙酰呋喃	—	225 270	2300 12900
2-羧基呋喃	—	214 243	3800 10700
2-硝基呋喃	—	225 315	3400 8100
吡咯（结构式，N-H）	己烷	209	9000
	7.6 mol/L H_2SO_4	241	7940
2-醛基吡咯	—	252 290	5000 16600
2-乙酰吡咯	—	250 287	4400 16000
2-乙酯基吡咯	—	231 303	14200 21000
1-乙酰吡咯	—	234 288	10800 760
噻吩（结构式）	乙醇	228 231	4900 7400
2-醛基噻吩		265 279	10500 6500
2-乙酰噻吩		252 273	10500 7200
2-羟基噻吩		249 269	11500 8200
2-硝基噻吩		268～272 294～298	6300 6000
2-溴噻吩		236	9100
咪唑（结构式）	乙醇	208 250	5000 60
1,2,3-三唑	乙醚	210	3980
噻唑（结构式）	乙醇	240	4000
吡唑（结构式）	乙醇	210	3390
	6mol·L^{-1}HCl	217	4680
异噁唑（结构式）	水	211	3980
噁唑	乙醇	240	—
四唑（结构式）	乙醇	205	—
1-甲基-2-丁基吡咯（结构式，$(CH_2)_3CH_3$，N-CH_3）	乙醇	214	2300

续表

化合物	溶剂	λ_{max}/nm	ε_{max}
六元杂环芳香族及其衍生物			
嘧啶	环己烷	199 244 298	10000 2000 325
2,6-二氨基嘧啶	水(pH6.5)	267	5.4×10^3
4,6-二氨基嘧啶	水(pH6.5)	260	6.4×10^3
吡嗪	已烷	194 260 328	6000 6000 1000
哒嗪	已烷	192 251 340	5400 1400 315
HCl	乙醇	254.5	5100
对称三嗪	环己烷	222 272	146 381
喹啉	乙醇	225 278 300 314	35000 3500 2600 3000
酞嗪	环己烷	218 259 296 357	59500 4100 715 54
吩嗪	乙醇 甲醇	250 370 248 362	120000 5000 12000 13000
吖啶	乙醇	250 355	201400 25300
N,*N*-二苯脲	乙醇	257	33.3×10^4
异喹啉	环己烷	227	8×10^4
吡咯烷	蒸气	196	2000
哌啶	蒸气	198	3000
1-甲基哌啶	乙醚	218	1600
吲哚	正己烷 环己烷	215 265 220	25000 6300 16000
咔唑		242 291	24000 19000

① 表中数据主要引自文献 [1] 的附表 1。

三、部分天然有机化合物的紫外吸收光谱数据

(一) 生物碱的紫外吸收光谱数据

表 13-14　部分生物碱的紫外吸收光谱数据②

名称	λ_{max}/nm($\lg\varepsilon$)	溶剂①
一般胺类生物碱		
麻黄碱	253(2.27),259(2.31),264(2.26)	I
麻黄碱盐酸盐	251(2.18),257(2.25),264(2.18)	W
墨斯卡灵		E
N-甲麻黄碱盐酸盐	251(2.20),257(2.27),264(2.19)	W
去甲基伪麻黄碱盐酸盐	251(2.11),257(2.11),264(2.20)	W
柳叶木蓝碱	≈280(≈3.6)	W
懋文因	226(4.36),273(3.38),283(3.20)	E
辣椒碱	227(3.85),281(3.40)	E
肉伯替明	226(4.13),278(3.29)	E
二氢肉伯替明	226(3.89),278(3.27)	E
二氢肉伯替明醇	226(3.82),278(3.08)	E
印枳碱	217(4.53),223(4.52),275(4.61)	E
益母草碱	276(4.0),239(4.3),326(4.7)	M
五亮豆碱	218(4.12),322(4.10)	E
菩提定	240(4.10),305(4.03),333(4.00)	—
石斛定	227(4.09),273(3.27),284(3.29)	E
荜拨宁酰胺	245(3.99),256(4.02),307(4.33),340(4.52)	E
芥子碱	268,307,345	—
米里胺 A	232(4.57),260(4.50),315(4.5),342(3.68)	M
咖萨因	223(4.26)	E
咖萨胺	225(4.20)	E
格木胺	222(4.20)	E
荜拨高酰胺	216(4.54),283(4.34),293(4.39),315(4.28)	E
毛胡椒碱	268,307,345	~
黑胡椒灵-乙	218(4.45),260(4.22)268(4.20),305(4.03),340(3.90)	M
次胡椒酰胺	245(4.02),261(4.03),309(4.28),343(4.52)	M
穆坪马兜铃酰胺	215(4.19),288(4.06),314(4.15)	E

续表

名称	λ_{max}/nm(lgε)	溶剂①
佩沙瓦灵	228(4.96),293(4.32),333(3.78)	E
那卢米定	237sh(4.39),292(4.05),335(4.15)	E
奥巴米定	227(4.38),240sh(4.32),308(4.10),337sh(3.94),390(4.28)	E
阿依特酰胺	236(4.73),280sh(4.01)321sh(3.68),324(3.65),332(3.81)	E
异阿依特酰胺	238(4.73),290(4.00),332(3.86)	—
麻黄多胺A	229,283	—
它斯品	245(4.41),285(3.62),333(3.49),348(3.57)	—
莨菪烷生物碱		
阿托品硫酸盐	247(2.22),252(2.27),255(2.32),264(2.27)	—
布鲁金	277(2.55),320(2.50)	E
古柯碱	230(4.19),274(2.98),281(2.89)	W
古柯碱盐酸盐	233(4.09),274(3.02)	W
[illegible]	217(4.20)	—
莨菪碱	247(2.22),252(2.27),255(2.30),264(2.27)	E
里豆灵	242(2.02),247(2.10),253(2.22),259(2.30),264(2.20),268(2.03)	—
东莨菪碱	249(2.02),252(2.08),259(2.14),263(2.06)	E
3α-惕各酰氧莨菪烷	217(3.51)	E
3α-惕各酰氧-6β-乙酰氧基-莨菪烷	217(3.99)	E
α-东莨菪宁	253(2.73),259(2.73),262(2.71),265(2.69)269sh	E
β-东莨菪宁	253(2.65),259(2.68),262(2.66),265(2.65),269sh	E
细产辛A	222(4.43)	E
甾体生物碱		
黄杨烯碱	243(3.94)	M
黄杨匹碱	240(4.73),247(4.02),255sh(4.43)	E
黄杨胺-E	238(4.41),246(4.46),254(4.26)	E
黄杨胺醇	238(4.39),245(4.41),254(4.24)	E
西法丁	296(1.84),λ_{min} 280(1.76)	E
α-西芬胺	280(0.5)	E
γ-西芬胺	252(1.4)	E
δ-西芬胺	250(1.5),305(1.78)	E
环黄杨米因	243(3.89)	E
环黄杨非因	243(3.95)	E
环黄杨苏灵	243(3.95)	E
环黄杨维里定	269(3.97)	E
环黄杨布辛	243(3.89)	E
环黄杨苏布辛	243(3.95)	E
β-杰尔明	~280(2.2)	E
柯洛那明	246(4.26)	E
异杰尔明	~250(2.0)	E
杰尔文	250(4.27),360(1.88)	E
芜菁因	244(4.10)	E
森拉包因	283(4.3)	—
去甲黄杨胺	238(4.44),246(4.47),254(4.26)	—
23-氧化苏拉柯斯替定	210(3.72),267(2.52),277(2.45),405(1.86)	E
24-氧化苏拉柯斯替定	270(2.1),345(1.57)	E
苏拉柯斯替定	239(2.56)	E
苏拉花定	240(2.41)	E
藜芦因	263(3.09)	H
藜芦胺	268(2.8),λ_{min}245(2.3)	E
藜芦酰棋盘花碱	265(4.12),294(3.90)	E
黄杨胺甲	238(3.42),246(3.67),254(3.40)	E
黄杨三烯宁乙	270(3.51),278(3.62),289(3.50)	E
16-去羟黄杨二烯宁乙	238(3.42),246(3.67),254(3.40)	E
西法京宁	285(2.25)	E
沙曼烯酮	244(4.18)	E
吡咯里西啶生物碱		
安果柯林	246	M
全缘千里光碱	212(4.03) 216(3.90)	E W
夹可嗪	233(3.24)	E
苦木奇灵	247(4.15),280(3.36),290(3.30)	M
纳欧辛	243(4.17),280(3.36),289(3.30)	M
佛恩辛-La	210(3.92),247(2.04),250(2.18),264(2.42)	E
佛恩辛-T	210(3.92),247(2.04),252(2.18)264(2.02)	E
普兰秋林	271(4.81)	—
倒千里碱	218(3.85) 218(3.92)	E M
迷迭香叶(千里光)碱	218(3.75)	W
千里光宁	215(3.38) 218(3.92) 215(4.00)	E M E
乌西门辛	203(4.10)	E
千里光菲灵	218(3.90)	M
瑞德灵	218(3.93)	M
倒千里光 N-氧化物	217(3.80)	W
阔叶千里光碱	219(3.80)	W
7-当归酰倒(千里光)裂碱	215(4.10)	E
蓝蓟碱	212(4.20)	E
拉替福林	217(4.12)	E
波卡西宁	222(3.92)	E
倒异西宁	220(3.44)	E
草酚酮生物碱		
草酚酮	228(4.36),237(4.36)320(3.83),351(3.76)	W
别秋水仙碱	278(5.14)	OH^-
秋水仙裂碱	244(4.51),351(4.28)	E
秋水仙碱乙醚	243(4.51),267sh(4.03)350(4.26),394sh(4.20)	M,OH
秋水仙碱	246(4.49),334sh(4.46)355(4.22)	E
柯弥格灵	238(4.50),355(4.23)	E
脱羰秋水仙裂碱	245(4.55),350(4.30)	E
脱羰秋水仙碱	245(4.55),355(4.22)	E

续表

名　　称	λ_{max}/nm(lgε)	溶剂[①]
去乙酰异秋水仙碱	244(4.49),345(4.28)	E
2-去甲秋水仙碱	245(4.54),353(4.27)	E
3-去甲秋水仙碱	340(4.55),353(4.26)	E
N-甲酰去乙酰秋水仙碱	247(4.51),350(4.27)	E
异秋水仙裂碱乙醚	229(4.41),247(4.53),343(4.30)	E
异秋水仙碱	244(4.44),345(4.28).	E
异脱羰秋水仙裂碱乙醚	247(4.48),345(4.28)	E
异脱羰秋水仙碱	245(4.54),345(4.25)	E
羟基秋水仙碱	234(3.24),281(2.50)	E
β-光化秋水仙碱	225(4.46),266(4.36),282sh(4.10),340(3.29)	E
γ-光化秋水仙碱	同 β-异构物	E
光化异秋水仙碱	218(4.42),260(4.34)	E
格冉鲁宾	232(4.95),254(4.79),296(4.58),363(4.72),384(4.41),400(4.19),480(3.90)	E
喹诺里西啶生物碱		
臭豆碱	233(3.83),309(3.90)	E
臭豆碱过氯酸盐	233(3.82),309(3.89)	M
无叶假木贼定(+)	248(4.10)	—
无叶假木贼定(—)	240(4.07)	E
鹰靛叶碱	240(3.81),309(3.90)	M
金雀花碱	235(3.70),308(3.80) λ_{min}253(2.80)	M
5,6-去氢-17-氧代无叶豆碱	212(4.10),249(3.70)	—
2,3-去氢-17-氧代无叶豆碱	242(4.20)	—
2,3-去氧-O-(2-吡咯酰基羽扇豆碱)	265(4.27)	E
13-乙基槐胺	240(3.77),309(3.98)	E
印车前明	286(3.70)	—
异无叶豆碱	216(3.79)	E
白金雀花碱	215(3.70)	E
里佛林	282(4.15)	M
里兹里定	292(3.85)	—
甲兹灵	260(4.08),284(4.14)	—
甲基金雀花碱	234(3.80),309(3.90)	M
多花羽扇豆碱	326(4.16),302(4.14),306(4.14)	E,H[+]cY
尼苏定	281(4.09)	M
羟基无叶豆碱	212(4.00)	E
奴塔灵	208(3.75)	E
无叶豆碱	214(3.71)	E
槐果碱(—)	260(3.40)	E
2-羟基-4-(3-羟基-4-甲氧基-苯基)喹诺里西啶	282(3.45)	E
去氢地柯定	287(4.06)	M
硫代双萍蓬定	298(3.04)	—
阿伯苏定	284(3.73),322(3.76)	E
马马宁	233(3.86),308(3.84)	M
格尼明	212,233,272,305	E
N-(3-丁酮)金雀花碱	232(3.81),306(3.89)	E
四氢异喹啉碱		
1,2,3,4-四氢异喹啉·HI	233sh(4.35),285(3.58),298sh(3.0)	E
冠影掌碱甲醚	285(3.59)	E
毛仙影掌碱	284(3.72)	E
毛仙影掌碱甲醚	282(2.68),320(2.07)	E
隐桂蓝碱Ⅰ	228(4.20),281(3.78)	—
隐桂蓝碱Ⅱ	281(3.57)	—
1,2,3,4-四氢-6,7-二甲氧-2-甲基-1-(3,4-次甲二氧基苯基)-异喹啉	235sh(4.10),287(3.89)	—
维波里定	200(4.4),214(3.8),280(3.4),288(3.4)	H_2O
维波灵	205(4.0),223(3.5)282(2.9),292(2.8)	H_2O
去甲氧基维波灵	203(4.4),223(3.7),281(3.2),292(3.0)	H_2O
甲氧基维波里定	201(4.5),223(3.9)275(3.4),286(3.4)	H_2O
三非林	232(4.59),307(3.87),321(3.82),335(3.77)	E
异三非林	234(4.66),307(4.02),321(3.94),336(3.90)	E
粟型碱		
原碱	225sh(4.22),283(3.83)	E
刺罂粟碱	287(4.01)	E
黑龙江(罂粟)辛	230(4.07),294(3.95),250sh(3.67)	—
黑龙江(罂粟)辛宁	2230(4.07),294(3.95),250sh(3.67)	—
厚壳桂碱	296.7	E
华厚壳桂碱	291.5(4.02)	E
厄耶臂定	291(4.08)	E
厄邻亭	295(4.08)	E
木尼他京	284,288,294(≈4.9)	环己烷
唐松粟碱	289(4.06)	E
锐福米定	235(4.00),248(3.72),294(3.93)	M
锐福胺	235sh(4.00),248sh(3.75),292(3.83)	M
锐福灵	230sh(4.00),248sh(2.43),290(3.92)	M
白蓬草定	250sh(4.08),291(4.30)	E
卡牙晷	225(4.07),292(3.95)	M
苄基异喹啉碱(四氢型)		
劳单宁	224sh(4.18),283(3.83),225(2.45)	E
劳单辛	225sh(4.4),282(3.78)	E
劳单辛盐酸盐	280(3.51)	E
木蓝箭毒碱	225(4.12),282(3.62)	E
去甲杏黄罂粟碱	228(4.19),282(3.70),287(3.69)	E
伪可待明	284(3.78)	E
网脉(番荔枝)碱	225sh(4.28),285(3.96)	E
杏黄罂粟碱	286(3.84)	E
肉桂劳灵	287(3.72)	E
衡州乌药碱	227(3.57),286(3.78)	E
多牙夫宁	225(4.20),286(3.76)	E
半瑞潜杜灵	284(3.65)	—
克帕卫灵	227sh(4.36),276(3.38),284(3.26)	E
	226(4.33),274(3.35),281(3.28)	H^+

续表

名称	λ_{max}/nm(lgε)	溶剂①
芳丹定	283.5(3.73)	E
拉得里辛	225(4.37),280(3.80)	—
芳都辛	229(5.17),286(4.61)	E
N-甲基衡州乌药碱	285(3.75)	E
黄柏碱碘化物	228(3.86),289(4.07)	E
罗默因	268(286)	—
唐松半得灵	282(3.49)	M
潆诺胺	257(3.44),282(3.43)	E
紫堇碱醇	240(3.75),294(3.83)	M
紫堇碱酮	240(4.36),292(4.08) 320(3.93)	M
多卡品	222(4.47),262sh (4.02),332(4.23)	E
N 氧瑞枯灵	283(3.81)	E
波福灵	233(4.50),260(4.18), 288sh(3.70),352(3.66)	M
雷德酮	238(4.58),289(4.12), 313(4.06)	E
延胡索米定	207(4.40),238(4.21) 290(3.74),314(3.72)	E
延胡索明	241(4.11),288(3.85)	E
未氢化异喹啉碱	263sh (3.52), 268 (3.55),277sh(3.45), 293sh(3.16)	E
异喹啉	306(3.36),313(3.35), 319(3.45)	E
	不变	OH^-
	268sh (3.27), 275 (3.29),283sh(3.11), 329(3.59)	H^-
罂粟碱	239(4.83),280(3.86), 314(3.60),327(3.67)	E
花菱胺	225(4.0),254(4.8),292 (4.0),314(4.1)	M
N-甲基-罂粟季碱	257(4.7),330(4.31)	E
高唐碱	220(4.54),265(4.54), 315—320(3.75)	M
双苄基异喹啉生物碱		
阿莫灵	285(3.88)	M
芒籽灵	284(3.92)	E
小檗宁	282(3.95)	H^+
谷树箭毒碱碘化物	225(4.79),280(3.85)	W
谷树箭毒碱二甲醚	280(4.20)	$CHCl_3$
轮环藤宁	≈280(≈3.80)	M
瑞香槠君	285(3.91)	M
瑞香醇灵	285(3.93)	M
达定	285(3.92)	E
达多达宁	285(3.90)	E
海牙替定	280(3.07)	E
核槠得京	282(3.95)	E
异箭毒素	≈280(≈3.80)	M
岛藤碱	≈280(≈3.80)	M
岛藤醇灵	≈280(≈3.80)	M
异莲心碱	286(4.03)	E
粉蓝硫定	283(3.34)	—
小花檬立米碱	286(3.73)	M
N-甲基-二氢门尼萨灵	284(3.77)	E
去甲粉防已碱	227(4.53),282(3.88)	E
去甲轮环藤宁	～280(～3.80)	M
O-甲基-小檗宁	285(3.99)	E
O-甲基-山豆根碱	285(3.98)	E
黄檗灵	283(3.86)	E
黄皮树碱	283(3.85)	E
尖刺(小檗)碱	285(3.85)	M
奥寨梯木亭	224(4.60),284(4.07), 292(4.00)	E
奥寨梯木辛	233(4.5),282(4.01), 298sh(3.90)	E
盐杜林	284(3.84)	E
绿心(碱)	233(4.41),285(4.07) 292sh(4.01)	E
瑞滑定	284(3.83)	M
瑟坯灵	284(3.79)	E
瑟坯灵盐酸盐	283(3.82)	E
千金藤酚双碱	284(4.03)	E
千金藤双亚胺	238(4.72),279(4.38), 308sh(4.09)	E
细柄瑞香楠碱	282(3.82)	E
唐松佛替定	275(3.88),285(3.88)	E
唐松达辛	275(3.67),282(3.66)	E
白蓬檗碱	240(4.17),280(3.92)	E
甲基白蓬檗碱	240(4.13),280(3.86)	E
白蓬灵	284(3.90)	M
高白蓬灵	284(3.90)	M
唐松得京	283(4.02)	E
缎藤碱	295(3.91)	—
缎藤次碱	290(3.95)	—
表千金藤碱	～280(4.2)	—
唐松甲川碱	280(4.13),314(3.87)	M
O-甲基唐松甲川碱	280(4.13),314(3.87)	M
木防己碱	288(3.75)	M
筒箭毒碱氯化物	225(4.79),280(3.85)	W
唐松绿果定	275(3.99),280(3.99)	M
唐松绿果辛	283(3.78)	M
唐松绿果胺	282(3.91)	M
巴基斯坦胺	225sh (4.63), 280 (4.12),310sh(3.61)	E
巴基斯坦宁	218(4.61),270(413), 277(4.21)	E
福来必辛	292(3.92)	E
宾夕法尼胺	276(4.07),284(4.17) 297sh(4.11),312(4.06)	M
宾夕法宁	284(4.26),304(4.15) 320sh(4.05)	M
异细柄瑞香楠碱	210,282	M
巴鲁特胺	224(4.57),260 (4.08),282(4.06), 294sh (3.97), 305sh (3.80)	E
丁拉柯灵	222 (4.70), 236sh (4.68),294(3.97)	M
格里沙宾	224(4.25),237(4.26), 287(4.17)	E
格里沙布亭	224(4.23),239(4.24), 287(4.00),320(3.25)	E
克柏灵	220(4.53),264(3.97), 272(4.02),292(3.80) 304(3.70)	M
克鲁考文	285(3.81)	E
林多胺	205(4.65),220(4.39), 280(3.91)	E
N-甲基阿波特林	280(3.61)	E
瑞福托平	281(4.40),302(4.24), 314(4.15)	M
西得宁	277(3.48),283(3.47)	E

续表

名　称	λ_{max}/nm(lgε)	溶剂[1]
三茅香明	210(4.72),232(4.67),273sh(4.21),311sh(3.46),357(3.05)	M
白蓬草茹明	241(4.47),283(4.01),300sh(3.91)	E
白蓬草特林	276(3.86),283(3.84)	M
白蓬草替定	280(4.38),304(4.21)	M
白蓬草福林	270(4.31),280(4.40),301(4.24),310sh(4.18)	M
白蓬草鲁亭	282(4.40),303sh(4.28),312(4.32)	M
白蓬草平	282(4.49),303sh(4.34),316sh(4.19)	M
白蓬草瑞宁	236(4.62),251(4.50),285(4.01),301(3.84),330(3.70)	
二氢白蓬草瑞宁	210(4.96),238(4.7),249(4.7),285(4.05),299(3.95),327(4.81)	
氧化白蓬草茹明	220(4.34),240(4.10),270(3.86),330(3.40)	
Cularine 及 Rotundine 碱		
枯拉灵	226(4.38),285(3.92)	E
枯拉灵明	285(3.64)	E
颅通定	288(3.80)	E
吗啡碱类生物碱		
可待因	211(4.38),239sh(3.07),286(3.19)	E
吗啡碱	233sh(3.71),285(3.18)	E
吗啡碱盐酸盐	209(4.42),232sh(3.70),285(3.19)	W
吗啡碱	226(4.04),248sh(3.73),299(3.44)	M, OH^-
尼奥品氢溴酸盐	239(3.87),284(3.17)	W
苛丽宁	218(4.56),274(3.35)	E
非洲千金藤碱	226(3.91),283(3.27)	E
非洲千金藤酮碱	229sh(4.26),287(4.18),325(4.24)	E
蒂巴因	226sh(4.18),285(3.87)	E
去甲蒂巴因	290(4.03)	—
防己碱盐酸盐	232(3.83),265(3.72)	W
阿克那地辛	266(2.45)	E
阿克那地宁	266(2.45)	E
阿克那地酰胺	232sh(3.84),267(3.98)	E
瑟法拉明	259(3.82)	E
异防己碱	235(3.87),267(3.90)	E
伪吗啡碱	230～232(4.56),257sh(3.98),285sh(3.64),321(3.80)	E, H^+
	230(4.56),306(3.96)	M, OH^-
坎生特灵	213(4.80),230sh(4.63),268(4.32),291(4.22),330(3.62),435(3.82)	E
黄巴豆亭	239(4.7),286(3.85)	E
黄巴豆宁	238(4.12),285(3.91)	E
异清风藤碱	241(4.19),275(3.83)	E
帕里定	235(4.08),283(3.81)	E
沙鲁他里定	240(4.19),277(3.76)	E
黑龙江罂粟碱	240(4.24),290(3.59)	M
异沙鲁他里定	235(4.08),283(3.81)	M
清风藤碱	240(4.25),277(3.75)	—
8,14-二氢沙鲁他里定	206(4.51),238(3.83),265(3.87)	—
安道西宾	216,240,278	—
去甲氧基-O-甲基安道西宾	240(4.16),280(3.75)	—
锐樟胺	230sh(3.96),247sh(3.55),290(3.60)	M
绕樟宁	220(4.24),294(3.32)	M
卡洛乌药灵	215(4.25),292(3.69)	E
异尖清风藤碱	235(4.08),283(3.81)	M
奥柯包春	210(4.52,264(4.11))	M
16-氧原间千金藤碱	230(3.97),273(3.90)	M
瑟比福灵	239,283	M
双阿定宁	263(4.32),293(4.00)	E
四氢原小檗碱类生物碱		
四氢小檗碱	284(3.71)	E
四氢巴马亭	230sh(4.25),281(3.75)	E
斯替复里定	214(4.40),287(3.79)	E
异紫堇杷明	230sh(4.4),282(3.79)	E
南天竹碱	230sh(4.1),286(3.80)	E
四氢黄连碱	237(3.85),289(3.79)	E
斯苛任	230(4.2),283(3.85)	E
四氢唐松酚碱	282(3.77)	E
咖坡任	230(4.7),276(3.45)	E
1-四氧基-四氢小檗碱	283.5(3.47)	E
密坎里定	286(3.74)	E
卡西定	206(4.86),228sh(4.08)	E
番荔枝宁	287(3.90)	E
2,10-二羟-3,11-二甲氧基四氢原小檗碱	289(3.75)	E
柯诺西定	208(4.56),229(4.16),282(3.67)	E
高木亭	228sh(4.25),282(3.77)	E
去甲考雷明	289(3.92)	E
伪表四氢小檗碱	225sh(4.09),288(3.68)	E
考雷明	225sh(4.09),286(3.99)	E
紫堇草酚碱	284(3.56)	M
斯替法洛亭	283(3.72)	E
O-甲基斯替法洛亭	282(3.75)	E
和千金藤碱	234(4.12),282(3.82)	M
锡生藤醇灵	233(4.13),286(3.86)	M
卡西那定	282(3.90)	M
紫堇碱	230sh(4.30),282(3.76)	E
紫堇鳞茎碱	230sh(4.25),282(3.76)	E
异紫堇鳞茎碱	225sh(4.25),283(3.80)	E
白莲草卡文	230sh(4.20),287(3.60)	E
碱 I	230sh(4.10),283(3.70)	E
索里达林	233(4.03),281(3.51),316(3.42),364(3.33)	M
白蓬叶碱	235(4.15),283(3.70)	E
α-13-甲基伪表四氢小檗碱	230(4.4),288(3.81)	E
二氢原小檗碱		
二氢小檗碱	280(4.10),368(4.25)	E
13-甲基二氢小檗碱	280(4.0),360(4.5)	E
二氢伪表小檗碱	260,280,375(4.2)	E
13-甲基二氢伪表小檗碱	262,283,370(4.1)	E
二氢小檗碱氯甲化物	240～250(3.97),350(4.39)	W

续表

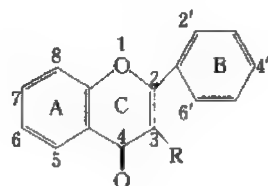
名　　称	λ_{max}/nm(lgε)	溶剂①
二氢黄连碱氯甲化物	215(4.42),255(3.84), 306(3.88) 343sh(4.26),357 (4.38),375(4.33)	W
黄嘌呤和嘌呤生物碱		
黄嘌呤	225(3.49),266(4.03), 241(3.95),276(3.97), 242sh(3.65),283(3.97)	pH5 pH10 pH14
1-甲基黄嘌呤	225(3.52),267(4.04), 242(3.93),276(3.98), 242sh(3.69),283(4.00)	pH5 pH10 pH14
3-甲基黄嘌呤	225sh(3.65),271 (4.00),274(4.10) 232sh(3.77),274(4.12)	pH5 pH10 pH14
7-甲基黄嘌呤	268(4.01) 231(3.68),287(3.93)	pH6 pH1
9-甲基黄嘌呤	235(3.86),264(397), 247(3.97),278(3.97)	pH5 pH10
1,3-二甲基黄嘌呤	272(4.02), 276(4.08)	pH6.7 pH10.8
1,7-二甲基黄嘌呤	269(4.01) 289(3.95),	pH6 pH10.6
1,9-二甲基黄嘌呤	238(3.82),263(3.98), 248(3.94),276(3.95)	pH3 pH9
3,7-二甲基黄嘌呤	271(4.01) 234sh(3.72),274(4.02), 234(3.85),273(4.01)	pH7 pH10 pH13
3,9-二甲基黄嘌呤	235(3.91),268(3.99), 240sh(3.82),269(4.01)	pH7 pH13
1,3,7-三甲基黄嘌呤(咖啡因)	227sh(3.74),272(4.02)	pH2 ~12
1,3,9-三甲基黄嘌呤(异咖啡因)	237(3.99),268(4.00)	pH6
嘌呤	< 220 (> 4.09), 260 (3.79), < 220 (> 3.48), 263 (3.90), 219(3.92),271(3.88)	pH0.3 pH5.7 pH11.0
鸟嘌呤	248(4.06),270sh(3.86), 245(4.04),274(3.92), 243(3.92),273(4.00), 273(3.98)	pH0 pH6 pH11 pH14
1-甲基鸟嘌呤	250(4.03),270sh(3.85), 249(4.01),273(3.91), 262sh(3.90),277(3.96)	pH0 pH6 pH3
7-甲基鸟嘌呤	250(4.04),270sh(3.85), 248(3.79),283(3.89), 240(3.81),280sh(3.89)	pH0 pH6 pH13
9-甲基鸟嘌呤	251(4.08),276(3.88), 252(4.10),270sh(3.97), 258sh(4.01),268(4.05)	pH0 pH6 pH13
1,7-二甲基鸟嘌呤	252(4.01),273(3.83), 250(3.75),283(3.89)	pH0 pH6
1,9-二甲基鸟嘌呤	254(4.05),279sh(3.88), 255(4.09),269sh(4.00)	pH0 pH6
赫必嘌呤	253(4.07)279(3.88), 252(3.77)282(3.92)	pH4 pH9.5
1,7-二甲基-2-胺基-6-氧代二氢嘌呤阳离子	254(4.05)280(3.89)	pH5
罂粟鲁宾生物碱		
阿品尼格宁	230(4.19)284(3.79)	E
阿品宁	231(4.19),286(3.80)	E
海罂粟胺	238(4.0),286(3.8)	M
海罂粟定	237(4.03),287(3.92)	M
异丽春花定	241,292	—
奥瑞定	235,285	…
罂粟鲁宾B	234(4.06),286(3.86)	E
罂粟鲁宾C	232(3.97),285(3.85)	E
罂粟鲁宾D	234(4.07),287(3.93)	E
罂粟鲁宾F	237(4.11),287(3.84)	M
罂粟鲁宾G	230,281	—
丽春花定	205(4.91),240(3.96), 292(3.94)	—

① I——异丙醇；W——水；E——乙醇；M——甲醇；A——丙酮；PY——吡啶；CY——环己烷；H——已烷；溶剂一栏中若给出 pH 值表示在该 pH 值下测定的 λ_{max}。

② sh——肩峰。

（二）黄酮类化合物的紫外吸收光谱数

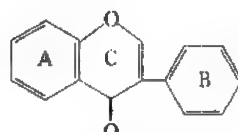
黄酮和黄酮醇的结构如下式所示，其氧取代类型及序号见表 13-15。



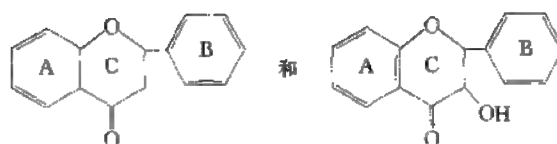
(1) R—H 黄酮

(2) R—OH 黄酮醇

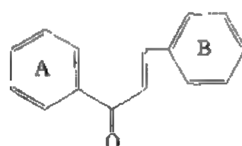
异黄酮的结构为



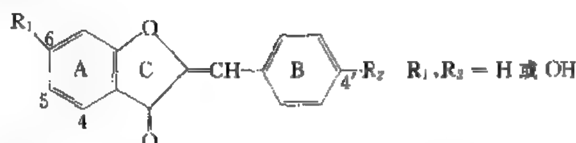
双氢黄酮和双氢黄酮醇的结构分别如下两式，其氧取代类型及序号见表 13-16。



查耳酮的结构为



噢哢（橙酮）的结构为



其氧取代类型及序号见表 13-17。

表 13-15 至表 13-17 中的序号和表 13-18 中的序号是相对应的，以便查找其相应的紫外吸收光谱数据。

表 13-15　黄酮和黄酮醇的氧取代类型及序号

序号	黄酮类	氧取代类型								
		5	6	7	8	2′	3′	4′	5′	6′
1	黄酮									
2	5-羟黄酮	OH								
3	7-羟黄酮			OH						
4	4′-甲氧黄酮							OCH_3		
5	3′,4′-二羟黄酮						OH	OH		
6	3′,4′-二甲氧黄酮						OCH_3	OCH_3		
7	白杨素	OH		OH						
8	7-甲白杨素	OH		OCH_3						
9	4′,7-二羟基黄酮			OH				OH		
10	4′,7-二羟黄酮-7-鼠李葡萄糖甙			-*O*-鼠-葡				OH		
11	5-去氧牡荆甙(拜银甙)			OH	*C*-葡			OH		
12	7-羟基-4′-甲氧黄酮(红车轴草黄酮)			OH				OCH_3		
13	3′,4′,7-三羟黄酮			OH			OH	OH		
14	3′,4′,7-三羟黄酮-7-鼠李葡萄糖甙			-*O*-鼠-葡			OH	OH		
15	7-羟-3′,4′-二甲氧黄酮			OH			OCH_3	OCH_3		
16	黄芩素(5,6,7-三羟黄酮)	OH	OH	OH						
17	黄芩甙(5,6,7-三羟黄酮 7-葡萄糖醛酸甙)	OH	OH	-*O*-葡 醛酸						
18	5,7,8-三羟黄酮(去甲汉黄芩素)	OH		OH		OH				
19	5,7,8-三羟黄酮 7-葡萄糖醛酸甙	OH		-*O*-葡 醛酸	OH					
20	洋芹素	OH		OH				OH		
21	洋芹素-7-葡萄糖甙	OH		*O*-葡				OH		
22	洋芹素-7-新橙皮糖甙	OH		*O*-新橙				OH		
23	异牡荆甙(洋芹素-6-*C*-葡萄吡喃糖甙)	OH	*C*-葡	OH				OH		
24	肥皂草甙	OH	*C*-葡	*O*-葡				OH		
25	牡荆甙	OH		OH	*C*-葡			OH		
26	鼠李糖牡荆甙	OH		OH	*C*-鼠-葡			OH		
27	2″-*O*-木糖牡荆甙	OH		OH	*C*-木-葡			OH		
28	佛来心甙	OH	*C*-糖	OH	*C* 糖			OH		
29	金合欢素	OH		OH				OCH_3		
30	金合欢素-7-葡萄糖甙	OH		O-葡				OCH_3		
31	5,7-二羟-2′-甲氧黄酮	OH		OH		OCH_3				

续表

序号	黄 酮 类	氧取代类型								
		5	6	7	8	2'	3'	4'	5'	6'
32	札坡剔宁	OH	OCH_3			OCH_3				OCH_3
33	札波亭	OCH_3	OCH_3			OCH_3				OCH_3
34	木犀草素	OH		OH			OH	OH		
35	木犀草素-7-葡萄糖甙	OH		O-葡			OH	OH		
36	木犀草素-7-芸香糖甙	OH		O-芸			OH	OH		
37	异荭草甙	OH	C-葡	OH			OH	OH		
38	红草甙	OH		OH	C-葡		OH	OH		
39	3'-羟新西兰牡荆甙-1	OH	C-糖	OH	C-糖		OH	OH		
40	柯伊利素	OH		OH			OCH_3	OH		
41	金雀花甙	OH		OH	C-葡		OCH_3	OH		
42	香叶木素	OH		OH			OH	OCH_3		
43	5,7-二羟-3',4'-二甲氧黄酮	OH		OH			OCH_3	OCH_3		
44	苜蓿素	OH		OH			OCH_3	OH	OCH_3	
45	5,7-二羟基-3',4',5'-三甲氧黄酮	OH		OH			OCH_3	OCH_3	OCH_3	
46	石吊兰素	OH	OCH_3	OH	OCH_3			OCH_3		
47	印度薄荷素	OH	OCH_3	OCH_3	OCH_3			OH		
48	沼泽向日葵素	OH	OCH_3	OH	OCH_3		OCH_3	OCH_3		
49	穗花杉双黄酮	{OH {OH		OH OH			OH OH			
50	金松双黄酮	{OH {OH	OCH_3 OH			OCH_3 OCH_3				

序号	黄 酮 醇 类	氧取代类型								
		3	5	6	7	8	2'	3'	4'	5'
51	3-羟黄酮	OH								
52	3-羟-4'-甲氧黄酮	OH							OCH_3	
53	3,4',7-三羟黄酮	OH			OH				OH	
54	高良姜素	OH	OH		OH					
55	高良姜素-3-甲醚	OCH_3	OH		OH					
56	3,3',4'-三羟黄酮	OH						OH	OH	
57	3-羟-3',4',-二甲氧黄酮	OH						OCH_3	OCH_3	
58	山奈素	OH	OH		OH				OH	
59	山奈素-7-新橙皮糖甙	OH	OH		O-新橙				OH	
60	山奈素-3-刺槐糖-7-鼠李糖甙	O-鼠-半乳	OH		O-鼠				OH	
61	山奈素-4'-甲醚	OH	OH		OH				OCH_3	
62	黄颜木素	OH			OH			OH	OH	
63	黄颜木素-3-葡萄糖甙	O-葡			OH			OH	OH	
64	草质素-8-甲醚	OH	OH		OH	OCH_3			OH	
65	槲皮素	OH	OH		OH			OH	OH	
66	槲皮素 7-鼠李糖甙	OH	OH		O-鼠			OH	OH	
67	槲皮素-3-半乳糖甙	O-半乳	OH		OH			OH	OH	
68	槲皮素-3-鼠李糖甙	O-鼠	OH		OH			OH	OH	
69	芸香甙	O-芸	OH		OH			OH	OH	
70	槲皮素-3,7-二葡萄糖甙	O-葡	OH		O-葡			OH	OH	
71	槲皮素-3-葡萄糖 7-鼠李糖甙	O-葡	OH		O-鼠			OH	OH	
72	槲皮素-3-葡萄糖 7-芸香糖甙	O-葡	OH		O-芸		OH	OH		
73	槲皮素-3-甲醚	OCH_3	OH		OH			OH	OH	
74	槲皮素-3-甲醚 4'-葡萄糖 7-双葡萄糖甙	OCH_3	OH		O-葡-葡			OH	-O-葡	
75	槲皮素-3',4',5,7-四甲醚	OH	OCH_3		OCH_3			OCH_3	OCH_3	
76	鼠李素	OH	OH		OCH_3			OH	OH	
77	异鼠李素	OH	OH		OH			OCH_3	OH	
78	异鼠李素-3-半乳糖甙	O-半乳	OH		OH			OCH_3	OH	
79	异鼠李素-3-芸香糖甙	O-芸	OH		OH			OCH_3	OH	
80	柽柳素-7-新橙皮糖甙	OH	OH		O-新橙			OH	OCH_3	
81	柽柳素-7-芸香糖甙	OH	OH		O-芸			OH	OCH_3	
82	桑色素	OH	OH		OH		OH		OH	
83	刺槐亭	OH			OH			OH	OH	OH
84	喷杜素	OCH_3	OH	OCH_3	OCH_3				OH	
85	喷杜甙	OCH_3	OH	OCH_3	OCH_3				O-葡	
86	3,5,6,7,8-五甲氧黄酮	OCH_3	OCH_3	OCH_3	OCH_3	OCH_3				

续表

序号	黄酮醇类	氧取代类型								
		3	5	6	7	8	2'	3'	4'	5'
87	棕鳞矢车菊素	OCH_3	OH	OCH_3	OH			OCH_3	OH	
88	棕鳞矢车菊甙	OCH_3	OH	OCH_3	O-葡			OCH_3	OH	
89	矢车菊甙	OCH_3	OH	OCH_3	O-葡			OH	OCH_3	
90	万寿菊素	OH	OH	OCH_3	OH			OH	OH	
91	万寿菊素-3-芸香糖甙	O-芸	OH	OCH_3	OH			OH	OH	
92	万寿菊素-7-葡萄糖甙	OH	OH	OCH_3	O-葡			OH	OH	
93	洋艾素	OCH_3	OH	OCH_3	OCH_3			OCH_3	OCH_3	
94	槲皮万寿菊素-3',4',5,6,7-五甲醚	OH	OCH_3	OCH_3	OCH_3			OCH_3	OCH_3	
95	槲皮万寿菊素-3,3',4',5,6-五甲醚	OCH_3	OCH_3	OCH_3	OH			OCH_3	OCH_3	
96	槲皮万寿菊素六甲醚	OCH_3	OCH_3	OCH_3	OCH_3			OCH_3	OCH_3	
97	棉皮素	OH	OH		OH	OH		OH	OH	
98	棉皮素-8-葡萄糖甙	OH	OH		OH	O-葡		OH	OH	
99	棉皮素-7-葡萄糖甙	OH	OH		O-葡	OH		OH	OH	
100	棉皮素六甲醚	OCH_3	OCH_3		OCH_3	OCH_3		OCH_3	OCH_3	
101	杨梅皮素	OH	OH		OH			OH	OH	OH
102	3',5,5'-三羟-3,4',6,7-四甲氧黄酮	OCH_3	OH	OCH_3	OCH_3			OH	OCH_3	OH

表 13-16 异黄酮、双氢黄酮和双氢黄酮醇的氧取代类型及序号

序号	化合物	氧取代类型							
		2	3	5	6	7	3'	4'	5'
	异黄酮类								
103	7-羟异黄酮					OH			
104	5,7-二羟异黄酮			OH		OH			
105	5,7-二甲氧异黄酮			OCH_3		OCH_3			
106	2-羧-5,7-二羟异黄酮	COOH		OH		OH			
107	大豆素					OH		OH	
108	大豆素-7-葡萄糖甙(大豆甙)					O-葡		OH	
109	芒柄花素					OH		OCH_3	
110	芒柄花素-7-葡萄糖甙					O-葡		OCH_3	
111	芒柄花素 7-葡萄糖甙四乙酰化物					-O-葡 四醋酸酯		OCH_3	
112	染料木素			OH		OH		OH	
113	染料木甙			OH		O-葡		OH	
114	圆荚草双糖甙			OH		O-芸		OH	
115	槐树甙			OH		OH		O-葡	
116	染料木素-5-甲醚			OCH_3		OH		OH	
117	李属异黄酮			OH		OCH_3		OH	
118	鹰嘴豆素甲			OH		OH		OCH_3	
119	澳白檀甙			OH		O-芹-葡		OCH_3	
120	兰花赝靛素				OH	OH		OCH_3	
121	兰花赝靛素-7-葡萄糖甙				OH	O-葡		OCH_3	
122	2-羧-6,7-二羟 4'-甲氧异黄酮	COOH			OH	OH		OCH_3	
123	阿夫罗摩辛				OCH_3	OH		OCH_3	
124	3',4',7-三羟异黄酮					OH	OH	OH	
125	ψ-赝靛素					OH	$-O-CH_2-O-$		
126	ψ-赝靛甙					O-芸	$-O-CH_2-O-$		
127	赝靛异黄酮					OH	OH	OH	OH
128	6-羟染料木素			OH	OH	OH		OH	
129	顶生鸢尾素			OH	OCH_3	OH		OH	
130	射干甙			OH	OCH_3	O-葡		OH	
131	尼泊尔鸢尾异黄酮			OH	OCH_3	OH		OCH_3	
132	紫檀素			OH		OH	OH	OH	
133	紫檀素-7-葡萄糖甙			OH		O-葡	OH	OH	
134	紫檀素-7-鼠李葡萄糖甙			OH		O-鼠-葡	OH	OH	
135	红车轴草异黄酮			OH		OH	OH	OCH_3	
136	桑橙素			OH	C_5H_9	$O-C_5H_8$	OH	OH	

续表

序号	化合物	氧取代类型							
		2	3	5	6	7	3'	4'	5'
137	鸢尾素			OH	OCH_3	OH	OCH_3	OCH_3	OH
138	鸢尾甙			OH	OCH_3	O-葡	OCH_3	OCH_3	OH
	双氢黄酮类								
139	乔松素			OH		OH			
140	甘草素					OH		OH	
141	5,6,7-三羟双氢黄酮			OH	OH	OH			
142	5,6,7-三羟双氢黄酮 7-葡萄糖醛酸甙			OH	OH	O-葡醛酸			
143	柚皮素			OH		OH		OH	
144	樱花甙			O-葡		OCH_3		OH	
145	北美圣草素			OH		OH	OH	OH	
146	橙皮甙			OH		O-芸	OH	OCH_3	
	双氢黄酮醇类								
147	鹰嘴豆双氢黄酮醇		OH			OH		OH	
148	双氢黄颜木素		OH			OH	OH	OH	
149	(+)双氢黄颜木素-3-葡萄糖甙		O-葡			OH	OH	OH	
150	双氢山柰素		OH	OH		OH		OH	
151	台黄杞甙		O-鼠	OH		OH		OH	
152	花旗松素		OH	OH		OH	OH	OH	
153	落新妇甙		O-鼠	OH		OH	OH	OH	
154	双氢刺槐亭		OH			OH	OH	OH	OH

表 13-17 查尔酮和噢哢的氧取代类型及序号

序号	化合物	氧取代类型						序号	化合物	氧取代类型					
		2'	3'	4'	2	3	4			3'	4'	4	5	6	7
	查尔酮类								**噢哢类**						
155	2-羟查尔酮				OH			166	4'-羟噢哢		OH				
156	4'-羟查尔酮			OH				167	3',4'-二羟噢哢	OH	OH				
157	2'-羟-4'-甲氧查尔酮	OH		OCH_3				168	5,7-二羟噢哢				OH		OH
158	3,4-二羟查尔酮					OH	OH	169	6,7-二羟噢哢					OH	OH
159	2,2'-二羟查尔酮	OH			OH			170	6-羟基-4'-甲氧噢哢		OCH_3			OH	
160	2',4-二羟查尔酮	OH					OH	171	6,7,3',4'-四羟噢哢(金鸡菊噢哢)	OH	OH			OH	OH
161	2',3',4'-三羟查尔酮	OH	OH	OH											
162	2',3,4-三羟查尔酮	OH				OH	OH	172	大花金鸡菊噢哢	OH	OH			OH	OCH_3
163	2,2',4-三羟查尔酮	OH			OH		OH								
164	2',4,4'-三羟查尔酮	OH		OH			OH	173	6-羟-3',4,4'-三甲氧噢哢	OCH_3	OCH_3	OCH_3		OH	
165	2',3,4,4'-四羟查尔酮	OH		OH		OH	OH	174	3'-羟-4,4',6-三甲氧噢哢	OH	OCH_3	OCH_3		OCH_3	

表 13-18 黄酮类化合物紫外吸收光谱数据①

序号	化合物名称	紫外光谱数据 (λ_{max}/nm)					
		MeOH	NaOMe	$AlCl_3$	$AlCl_3$/HCl	NaOAc	NaOAc/H_3BO_3
	黄酮类						
1	黄酮	250,294,307sh	250,294,309sh	250,293,306sh	250,293,309sh	248,292,307sh	255sh, 294, 307sh
2	5-羟黄酮	268,296sh,333	272, 380	290,318sh,394	291,319sh,393	270,297sh,335	268,298sh,334
3	7-羟黄酮	252, 268, 307	266, 307, 359	249, 307	251,307,372sh	256, 307, 358	255sh, 270sh, 309
4	4'-甲氧黄酮	253, 317	254, 316	253, 317	253, 319	257sh	257sh, 319
5	3',4'-二羟黄酮	242,308sh,340	249sh, 278, 302, 404	248sh, 273sh, 304,378,468sh	242,312sh,342	305, 348, 400	306, 365
6	3',4'-二甲氧黄酮	242,314sh,333	241,314sh,334	243, 315sh, 333,	242,315sh,333	312sh, 334	314sh, 334
7	白杨素	247sh,268,313	288, 263sh, 277, 361	252, 279, 330, 380	251, 280, 326, 381	275, 359	269, 315
8	7-甲白杨素	248sh, 267, 303sh	245, 271	252, 280, 328, 380	252, 280, 325, 380	268, 308	268, 309

续表

序号	化合物名称	紫外光谱数据 (λ_{max}/nm)					
		MeOH	NaOMe	$AlCl_3$	$AlCl_3$/HCl	NaOAc	NaOAc/H_3BO_3
9	4',7-二羟黄酮	253sh, 312sh, 328	251, 263sh, 329, 386	231sh, 255sh, 313sh, 327, 383sh	246sh, 255sh, 310sh, 328, 396	261, 309, 320sh, 369	256sh, 314sh, 329
10	4',7-二羟黄酮-7-鼠李葡萄糖甙	255sh, 311sh, 325	251sh, 294, 304sh, 385	255sh, 310sh, 327	253sh, 310sh, 327	257sh, 307, 331, 386sh	256sh, 312, 328
11	5-去氧牡荆甙(拜银甙)	255sh, 312sh, 328	255, 267, 333, 390	254sh, 313, 331, 384	252sh, 311, 330, 398	268, 310, 320sh, 370	258, 315sh, 332
12	7-羟-4'-甲氧黄酮(红车轴草黄酮)	253, 314sh	266, 360	253sh, 255sh, 312, 325, 391	248sh, 255sh, 312, 325, 391	270, 311, 320sh, 344	257sh, 311sh, 325
13	3',4',7-三羟黄酮	235, 250sh, 309, 343	256, 313sh, 338sh, 395	234sh, 305, 371, 458	235sh, 254sh, 307, 340, 409	255, 310, 373	258sh, 306, 360
14	3',4',7-三羟黄酮-7-鼠李葡萄糖甙	247sh, 255sh, 341	293, 405	244sh, 258sh, 300, 380	247sh, 257sh, 306, 341	257sh, 299, 350, 401	257sh, 299, 365
15	7-羟-3',4'-二甲氧黄酮	239, 262sh, 330	270, 314, 348	261, 277, 301, 337, 395sh	259, 277sh, 301, 341, 394	265, 338	264sh, 331
16	黄芩素	247sh, 274, 323	257, 366, 410sh	247, 272, 284sh, 375	255sh, 282, 292sh, 346	257, 360, 405sh	262sh, 277, 333
17	黄芩甙	244, 278, 315	263, 357sh,	249sh, 288, 343	248sh, 289, 338	277, 305sh, 394sh (dec.)	283, 318sh
18	5,7,8-三羟黄酮(去甲汉黄芩素)	264sh		292sh, 315, 366sh	290sh, 302, 342sh, 395sh	274 (dec.)	287
19	5,7,8-三羟黄酮-7-葡萄糖醛甙	247, 274, 315sh, 342sh	236sh, 281, 357	252, 286sh, 292, 331, 396	248, 283sh, 289, 327, 387	264sh, 281, 366	277, 346
20	洋芹素	267, 296sh, 336	275, 324, 392	276, 301, 348, 384	276, 299, 340, 381	274, 301, 376	268, 302sh, 338
21	洋芹素-7-葡萄糖甙	268, 333	245sh, 269, 301sh, 386	276, 300, 348, 386	277, 299, 341, 382	256sh, 267, 355, 387	267, 340
22	洋芹素-7-新橙皮糖甙	268, 333	245sh, 267, 300sh, 386	275, 300, 348, 382	276, 299, 341, 380	257sh, 267, 354, 387	267, 341
23	异牡荆甙	271, 336	278, 329, 398	262sh, 278, 304, 352, 382	260sh, 280, 302, 344, 380	279, 303, 385	274, 346, 408sh
24	肥皂草甙	271, 336	249sh, 271, 304sh, 389	268sh, 277, 301, 352, 381	279, 300, 344, 378	261sh, 271, 350, 392	269, 341
25	牡荆甙	270, 302sh, 336	279, 329, 395	277, 305, 350, 386	278, 303, 343, 383	280, 300, 379	271, 329sh, 344
26	鼠李糖基牡荆甙	270, 303sh, 336	281, 331, 396	277, 305, 349, 386	278, 303, 343, 383	281, 303sh, 382	270, 330sh, 344
27	2''-*O*-木糖基牡荆甙	270, 301sh, 335	280, 329, 395	277, 305, 350, 382	278, 303, 343, 382	280, 305sh, 381	272, 284sh, 309sh, 324, 342
28	佛来心甙	274, 311sh, 335	281, 333, 398	265sh, 281, 307, 353, 387	263sh, 282, 306, 347, 383	281, 304sh, 388	274, 330sh, 348, 412sh
29	金合欢素	269, 303sh, 327	276, 295sh, 364	259sh, 277, 292sh, 302, 344, 382	260sh, 279, 294sh, 300, 338, 379	276, 297sh, 358	269, 309sh, 331
30	金合欢素-7-葡萄糖甙	268, 324	244sh, 287, 357	277, 300, 345, 383	278, 299, 338, 381	268, 324	269, 328
31	5,7-二羟-2'-甲氧黄酮	266, 325	273, 323sh, 362	252, 276, 344, 375	252, 277, 337, 378	271, 325sh, 356	267, 330
32	札坡剔宁	264, 307sh, 348sh	248, 269, 394	236, 255sh, 275, 296sh, 325sh, 411	236, 274, 293sh, 326sh, 410	263, 349sh	264, 312sh, 349sh
33	札波亭	255sh, 325	255sh, 295sh, 323	255sh, 325	255sh, 324	258sh, 324	259sh, 324
34	木犀草素	242sh, 253, 267, 291sh, 349	266sh, 329sh, 401	274, 300sh, 328, 426	266sh, 275, 294sh, 355, 385	269, 326h, 384	259, 301sh, 370, 430sh
35	木犀草素-7-葡萄糖甙	255, 267sh, 348	263, 300sh, 394	274, 298sh, 329, 432	273, 294sh, 358, 387	259, 266sh, 365sh, 405	259, 372
36	木犀草素-7-芸香糖甙	255, 267sh, 349	263, 299sh, 394	272, 296sh, 331, 432	272, 295, 359, 389	259, 266sh, 366, 403	258, 370
37	异荭草甙	242sh, 255, 271, 349	267, 278sh, 337sh, 406	278, 302sh, 332, 429	265sh, 279, 296sh, 361,	267, 323, 393	265, 377, 429sh
38	荭草甙	255, 267, 293sh, 346	268, 278sh, 334sh, 405	276, 302sh, 329, 429	265sh, 276, 296sh, 357, 384	278, 325, 386	264, 375, 430sh

续表

序号	化合物名称	紫外光谱数据 (λ_{max}/nm)					
		MeOH	NaOMe	$AlCl_3$	$AlCl_3$/HCl	NaOAc	NaOAc/H_3BO_3
39	3'-羟新西兰牡荆甙	257, 272, 349	240sh, 266, 280, 344sh, 408	280, 303sh, 332, 430	265sh, 278, 297sh, 359, 384sh	271sh, 282, 326, 398	266, 287sh, 382, 430
40	柯伊利素	241, 249sh, 269, 347	264, 275sh, 329sh, 405	262, 274, 296, 366sh 390	259, 276, 294, 353, 386	271, 321, 396	268, 349
41	金雀花甙	251, 270, 345	265, 277, 334sh, 406	265sh, 274, 296sh, 364sh, 392	263sh, 277, 296, 354, 382	271sh, 279, 321, 394	271, 351
42	香叶木素	240sh, 252, 267, 291sh, 344	270, 303sh, 386	267sh, 273, 296, 362, 390	264sh, 276, 295, 351, 383	275, 322, 367	253sh, 268, 348
43	5, 7-二羟 3', 4'-二甲氧黄酮	240, 248sh, 269, 291sh, 340	277, 312, 369	261, 276, 295, 359, 387	259, 279, 293sh, 348, 381sh	276, 318, 357	269, 341
44	苜蓿素	244, 269, 299sh, 350	263, 275sh, 330, 416	258sh, 277, 303, 366sh, 393	259sh, 277, 302, 360, 386	264, 276sh, 321, 414	270, 304sh, 350, 422sh 482sh
45	5, 7-二羟-3', 4', 5'-三甲氧黄酮	270, 310sh, 331	278, 300sh, 367	253sh, 278, 300, 348, 385sh	280, 298sh, 340, 382sh	277, 299sh, 359	272, 313sh, 330
46	石吊兰素	284, 329	283, 300sh, 377	265sh, 290sh, 310, 356, 413sh	262, 289sh, 309, 351, 404sh	283, 302sh, 376	286, 322sh, 409sh
47	印度薄荷素	281, 294sh, 332	275, 362sh, 391	267sh, 288, 311, 361, 407sh	265sh, 290, 311, 354, 408sh	277, 297sh, 339, 390	279, 296sh, 336
48	沼泽向日葵素	250sh, 279, 336	285, 310sh, 363	257sh, 290, 365	257sh, 293, 357, 412sh	283, 312sh, 378	281, 329
49	穗花杉双黄酮	269, 291sh, 335	275, 295sh, 382	260sh, 277, 299, 350, 386	262sh, 279, 299, 343, 385	274, 292sh, 369	271, 332
50	金松双黄酮	271, 326	285, 357sh	260sh, 279, 298sh, 345, 383	259sh, 281, 298sh, 339, 382	271, 282, 316sh, 340	271, 327
51	3-羟黄酮	239, 243sh, 306, 344	237, 250sh, 275, 309sh, 405	248, 264sh, 327, 393	248, 265sh, 325, 400	304, 346, 361sh, 405	306, 345, 360sh, 407sh
52	3-羟-4'-甲氧黄酮	232, 252, 318sh, 355	256, 259sh, 277sh, 311sh, 409	232, 251, 263sh, 331, 416	233, 253, 262sh, 330, 417	254sh, 315, 357, 411sh	254sh, 319sh, 355
53	3, 4', 7-三羟黄酮	258, 280sh, 318, 356	275, 289sh, 318, 328, 407 (dec.)	256sh, 271, 306sh, 323, 419	255sh, 271, 305sh, 323, 418	268, 285sh, 316sh, 327, 378, 430sh	259, 276sh, 318, 357, 425sh
54	高良姜素	267, 305sh, 359	280, 327sh, 412	249, 273, 300sh, 337, 413	249, 274, 302sh, 334, 412	275, 301sh, 328sh, 388	267, 300sh, 317sh, 361
55	高良姜素-3-甲醚	266, 312sh, 340sh	276, 360	278, 333, 393	278, 329, 391	278, 364	267, 332sh
56	3, 3', 4'-三羟黄酮	248, 309sh, 366	244, 293, 324sh, 425	235, 270, 319, 371sh, 466	260, 323, 427	253sh, 322sh, 373, 430	251sh, 310sh, 326sh, 388
57	3-羟-3', 4' 二甲氧黄酮	246, 307sh, 320sh, 355	263, 285sh, 317sh, 412	257, 328, 423	256, 329, 422	320sh, 364, 421sh	306sh, 323sh, 361
58	山奈素	253sh, 266, 294sh, 322sh, 367	278, 316, 416	260sh, 268, 303sh, 350, 424	256sh, 269, 303sh, 348, 424	274, 303, 387	267, 297sh, 320sh, 372
59	山奈素-7-新橙皮糖甙	253, 266, 323, 364	245, 267, 335sh, 425	259sh, 266, 289sh, 353, 424	244sh, 258sh, 266, 300sh, 350, 422	261, 323, 385, 419sh	265sh, 325sh, 370
60	山奈素-3-刺槐糖-7-鼠李糖甙	244sh, 265, 315sh, 350	246, 269, 301sh, 350sh, 389	255sh, 274, 301, 354, 400	274, 298sh, 348, 398	265, 318sh, 358, 406sh	265, 319sh, 352
61	山奈素-4'-甲醚	253sh, 267, 299sh, 320, 367	280, 323sh, 411	254sh, 271, 305, 350, 423	257sh, 270, 305sh, 347, 422	259sh, 274, 301sh, 384	268, 299sh, 319, 367
62	黄颜木素	248, 262sh, 307sh, 319, 362	252, 292, 341	268sh, 281, 318sh, 458	263, 274sh, 322, 423	263sh, 321, 331, 378	265sh, 315, 381
63	黄颜木素-3-葡萄糖甙	254sh, 310, 340	256, 324, 408	276, 317sh, 381 (水解)	254, 273sh, 307, 252sh, 408sh, 420	256sh, 317, 369	310, 355
64	草质素-8-甲醚	259sh, 276, 327, 377	269, 338, 430	248sh, 262sh, 276, 310, 359, 435	247sh, 261sh, 274, 308, 357, 434	257sh, 282, 319, 341sh, 401	275, 309sh, 322, 382
65	槲皮素	255, 269sh, 301sh, 370	247sh, 321	272, 304sh, 333, 458	265, 301sh, 359, 428	257sh, 274, 329, 390	261, 303sh, 388
66	槲皮素-7-鼠李糖甙	256, 269sh, 372	241sh, 291, 367, 457	259sh, 273, 333, 458	268, 303sh, 365, 426	286, 378, 428sh (dec.)	261, 289sh, 386

续表

序号	化合物名称	紫外光谱数据(λ_{max}/nm)					
		MeOH	NaOMe	$AlCl_3$	$AlCl_3$/HCl	NaOAc	NaOAc/H_3BO_3
67	槲皮素-3-半乳糖甙	257,269sh,299sh,362	272,327,409	275,305sh,331sh,438	268,299sh,366sh,405	274,324,380	262,298sh,377
68	槲皮素-3-鼠李糖甙	256,265sh,301sh,350	270,326,393	276,304sh,333,430	272,303sh,353,401	272,322sh,372	260,300sh,367
69	芸香甙	259,266sh,299sh,359	272,327,410	275,303sh,433	271,300,364sh,402	271,325,393	262,298,387
70	槲皮素-3,7-二葡萄糖甙	256,268sh,355	268,300sh,396	275,298sh,335,440	270,299sh,363sh,402	261,295sh,371,423sh	261,380
71	槲皮素-3-葡萄糖-7-鼠李糖甙	257,269sh,358	244,270,396	276,300sh,343sh,441	270,300sh,366sh,404	260,294sh,370,416sh	261,294sh,380
72	槲皮素-3-葡萄糖-7-芸香糖甙	257,269sh,358	244,270,396	276,300sh,343sh,441	270,300sh,366sh,404	260,294sh,370,416sh	261,294sh,380
73	槲皮素-3-甲醚	257,269sh,294sh,359	272,329,407	277,303sh,336,443	268,277sh,299sh,360,402	273,323,383	262,298sh,378
74	槲皮素-3-甲醚 4'-葡萄糖-7-双葡萄糖甙	254,269,349	268,376	275,298sh,355,400	265sh,279,297sh,348,399	261,350	254,267,350
75	槲皮素-3',4',5,7-四甲醚	252,270sh,304sh,362	263,400	262, 269sh,308sh,343sh 421	260,268sh,303sh,342sh 420	250,268sh,365,414	249sh,269sh,304sh,361,424sh
76	鼠李素	256,270sh,295sh,371	242,286,331,432	273,302sh,330sh,451	268,299sh,363sh,423	255,292sh,387,422sh	260,389
77	异鼠李素	253,267sh,306sh,326sh,370	240sh, 271,328,435	264, 304sh,361sh,431	242sh,262,271sh, 302sh,357,428	260sh,274,320,393	255,270sh,306sh, 326sh,377
78	异鼠李素-3-半乳糖甙	255,268sh,303sh,357	272,327,415	269,299sh,365sh,407	267,298sh,357,403	274,316,387	257,267sh,307sh,361
79	异鼠李素-3-芸香糖甙	254,265sh,305sh,356	271,328,414	268,278sh,300sh,369sh,402	267,275sh,300sh,359sh,399	271,320,396	254,267sh,304sh,360
80	柽柳素-7-新橙皮糖甙	255,269sh,369	243,268,420	266,301sh,360sh,429	242,266,301sh,361,427	257,266sh,328sh,386,419sh	255,272sh,372
81	柽柳素-7-芸香糖甙	255,271sh,291sh,367	242,268,415	266,303sh,365sh,427	266,301sh,359,423	256,265sh,327,388,415sh	255,269sh,292sh,371
82	桑色素	254sh,264,370	278,314,418	268,299sh,352,421	267,298sh,349,419	272,315sh,399	259sh,267,301sh,374
83	刺槐亭	252,266sh,320,367	264sh,333,475	273,281sh,313,447	267,275sh,318,426	257sh,30?sh,346	256sh,316,385,462sh
84	喷社素	271,340	245sh,274,302sh,350sh,388	268sh,280,302sh,369,396sh	265sh,283,302sh,359,402sh	273,294sh,348,396sh	271,343
85	喷社甙	253sh,273,330	246sh,290,371sh	262,287,303sh,359,403sh	262,288,301sh,356,402sh	275,328	273,332
86	3,5,6,7,8-五甲氧黄酮	268,309,338sh	268,310,335sh	268,309,338sh	268,310,340sh	268,310,334sh	268,310,335sh
87	棕鳞矢车菊素	256,271,351	272,334,412	267,281sh,301sh,384	263,279,300sh,368,411sh	273,322,394	266,288sh,363
88	棕鳞矢车菊甙	257,272sh,352	248,270,401	270,280sh,296sh,387	267,280sh,299sh,369,407sh	262,373sh,416	257,271sh,356
89	矢车菊甙	256,270sh,350	273,381	271,281sh,297sh,381,	268, 281,299sh, 368,404sh	257,272,348	257,271,353
90	万寿菊素	258,272sh,293sh,371	251sh,296sh,336,411sh	238,275,308sh,327sh,459	240,268,302sh,381sh,427	258sh,274sh,340,394sh	264,393
91	万寿菊素 3-芸香糖甙	259,269sh,356	273,337,411	278,310sh,341sh,435	269,279sh,301sh,375,404sh	272,328sh,392	265,381
92	万寿菊素-7-葡萄糖甙	259,273sh,338sh,373	242, 292, 382,467	276,349,462	269,302sh,380sh,431	258, 343, 397,417sh	265,394
93	洋艾素	254,273,345	250sh,289,325sh,384sh	266,280sh,299sh,377	264,284,366,403sh	253sh,274,341	254,272,346

续表

序号	化合物名称	紫外光谱数据(λ_{max}/nm)					
		MeOH	NaOMe	$AlCl_3$	$AlCl_3$/HCl	NaOAc	NaOAc/H_3BO_3
94	槲皮万寿菊素	254,354	268,327,403	268,354sh,421	268,354sh,421	254sh,361,420sh	252sh,360,416sh
95	槲皮万寿菊素	251sh,265sh,338	269,317,363	245sh,267sh,335	245sh,265sh,336	269,317,365	263sh,339
96	槲皮万寿菊素-六甲醚	242,252sh,266sh,333	254sh,267sh,334	251sh,264sh,331	255sh,267sh,329	264sh,333	267sh,331
97	棉皮素	261,276,309,339,385	251,287,366	290,327,401,492	274,292sh,313,372,447	282,366	273,282sh,314sh,358,406
98	棉皮素-8-葡萄糖甙	260,273sh,328sh,380	245sh,295sh,331,430sh	260sh,275,309sh,364sh,452	269,307sh,367,441	281,328,400	267,277sh,325,400
99	棉皮素-7-葡萄糖甙	261,279sh,307sh,343,385	278,371	266sh,277,321sh,475	257sh,272,289sh,316sh,373,454	273,390,450sh	266,399
100	棉皮素六甲醚	252,271,301sh,351	252,271,301sh,351	252,271,351	252,271,351	252,270,301sh,353	252sh,271,353
101	杨梅皮素	254,272sh,301sh,374	262sh,285sh,322,423	271,316sh,450	266,275sh,308sh,360sh,428	269,335	258,304sh,392,
102	3',5,5'-三羟基-3,4',6,7-四甲氧基黄酮	270,335	269,327,366	280,306sh,367,398sh	283,306sh,355,403sh	270,336	269,339
	异黄酮类						
103	7-羟异黄酮	242,299,305sh	264,336	243,299,305sh	243,299,305sh	263,311sh,336	252sh,301
104	5,7-二羟基异黄酮	259,303sh,315sh	274,329	272,311,367	273,313sh,367	273,327	260,317sh
105	5,7-二甲氧基异黄酮	251,308sh	251,309sh	250,305sh	250,305sh	252sh,306sh	252sh,306sh
106	2-羧-5,7-二羟异黄酮	257,298sh,323sh	272,332	243sh,281,324	278,317sh	271,331	258,309sh
107	大豆素	238sh,249,259sh,303sh	259,289sh,328	240sh,249,260sh,300sh	240sh,249,262sh,302sh	253,272sh,310,330sh	261sh,303
108	大豆素 7 葡萄糖甙(大豆甙)	256,313sh	256,272sh,320sh	258,304sh	257, 303sh,262sh	256,322sh	254,318sh
109	芒柄花素	240sh,248,259sh,311	255,273sh,335	239sh,284,261sh,301	240sh,249,261sh,301	254,312sh,334	264sh,303
110	芒柄花素-7-葡萄糖甙	251sh,258,301sh	250sh,258,301sh	251sh,259,300sh	250sh,257,301sh	257,304sh	255,302sh
111	芒柄花素 7 葡萄糖甙四乙酰化物	250sh,258,302sh	251sh,259,302sh	251sh,259,302sh	251sh,260,304sh	259,305sh	259,302sh
112	染料木素	261,328sh	276,327sh	272,307sh,372	273,309sh,372	271,325	262,336sh
113	染料木甙	261,330sh	271,356sh	272,308sh,375	272,307sh,374	261,331sh	261,328sh
114	圆荚草双糖甙	262,327sh	270,307sh,351sh	271,308sh,378	272,307sh,378	262,289sh,325sh	262,289sh,325sh
115	槐树甙	261,324sh	248sh,274,326	273,311sh,371	273,312sh,371	272,326	262,327sh
116	染料木素-5-甲醚	256,283sh,317sh	266,295sh	256,286sh,317sh	256,284sh,316sh	264,315	256,321sh
117	李属异黄酮	262,327sh	272,353sh	273,309sh,374	274,310sh,370	262,330sh	262,332sh
118	鹰嘴豆素甲	261,330sh	249sh,273,327	273,310sh,375	273,310sh,373	272,327	262,330sh
119	澳白檀甙	262,325sh	244sh,267,368	273,305sh,382	273,304sh,380	261,321sh	261,320sh
120	兰花腈靛素	255,325	254,351	237sh,251,344	257,325	253sh,339	253sh,338
121	兰花腈靛素-7-葡萄糖甙	259,326	255,278sh,368	260,325	259,325	257,333,366sh	259,328
122	2-羧-6,7-二羟-4'甲氧基异黄酮	238,254sh,323	249,349	246sh, 289sh,363	238,276sh,336	251sh,343	335
123	阿夫罗摩辛	258,320	258,349	255,319	255,318	256,347	256,325
124	3',4',7-三羟基异黄酮	240,249,260sh,293,308sh	257,336	246sh,275,296,364sh	241,249,261sh,292,309sh	257,291sh,331	271,297,351sh
125	4-腈靛素	241,250,262sh,295,345sh	259,293sh,335	242sh,249,264sh,296	242sh,249,262sh,295	259,297sh,333	251,262sh,296
126	4-腈靛甙	249,261,292	249,261,292	250,262,291	249,261,291	261,291	261,291

续表

序号	化合物名称	紫外光谱数据(λ_{max}/nm)					
		MeOH	NaOMe	$AlCl_3$	$AlCl_3$/HCl	NaOAc	NaOAc/H_3BO_3
127	腰椗异黄酮	239, 247, 265, 304sh	245,255sh, 286sh,335	238,246sh, 283,302sh	238,246sh, 266,302sh	255,285sh,330	247sh,258sh, 304sh
128	6-羟染料木素	245sh,270, 350sh	259,307,330sh	239,248sh, 275,295sh,356	281,329	250sh,303, 338sh,418	275,320
129	顶生鸢尾素	267,330sh	278,328	276,311,378	277,309sh,366	273,339	268,335sh
130	射干甙	266,331	274,365	277,315sh,380	278,322sh,381	266,331sh	266,330sh
131	尼泊尔鸢尾异黄酮	265,335sh	248,273,339	276,316,378	277,312sh,373	273,339	271,333
132	紫檀素	262,294sh, 338sh	269,334	270,298sh,365	273,371	270,322	266,294sh
133	紫檀素-7-葡萄糖甙	262,290sh, 343sh	294sh,337	269,297sh,372	272,297sh,376	261,331sh	258,269sh, 293sh,322sh
134	紫檀素-7-鼠李葡萄糖甙	262,290sh, 343sh	294sh,337	269,297sh,372	272,297sh,376	261,331sh	258,269sh, 293sh,322sh
135	红车轴草异黄酮	262,292sh, 330sh	270,321	272,311sh,371	273,314sh,371	271,325sh	263,295sh, 335sh
136	桑橙素	274,353sh	271	284	285	274,352sh	276,352sh
137	鸢尾素	268,336sh	273,336	275,316,371	287,315sh,374	273,338	268,339sh
138	鸢尾素	268,331sh	270,356	277,319sh,382	278,379	268,335sh	268,335sh
	双氢黄酮类						
139	乔松素	289,325sh	245,324	311,375	309,373	253sh,323	291,326sh
140	甘草素	276,312	250,298sh, 327sh,335	276,311	276,311	255sh,282, 327sh,335	278,312
141	5,6,7-三羟双氢黄酮	242sh,295, 362sh	245,300,377	251sh,328, 381sh	251sh,317, 373sh	248sh,299,385	249sh,304,371
142	5,6,7-三羟双氢黄酮-7-葡萄糖醛酸甙	239,288,362	253sh,295, 345sh	237sh,316,432	237sh,314,427	287,353	284,377
143	柚皮素	289,326sh	245,323	312,375	311,371	284h,323	290,332sh
144	樱花甙	280,317sh	315,393	280,312sh	280,310sh	279,314sh	279,313sh
145	北美圣草素	289,324sh	246,324	310,378	309,373	289sh,325	289,333sh
146	橙皮甙	283,326	242,286,356	308,383	306,379	284,328	284,326
	双氢黄酮醇类						
147	鹰嘴豆双氢黄酮	276,311	250,297sh,334	309,347sh	276,309,408sh	254,282,334	277,312
148	双氢黄颜木素	277,310	252,297sh,334	235,308,349sh	234,278,308	256sh,285,334	281,314sh
149	(+)双氢黄颜木素-3-葡萄糖甙	234sh,280, 311sh	252,296sh,337	237,281,318sh	234sh,280, 311sh,394sh	254sh,288,338	284,315sh
150	双氢山奈素	291,329sh	246,325	274sh,316,382	280sh,312,378	254sh,284sh, 327	296,336sh
151	台黄杞甙	293,332sh	248,327	277sh,329, 383sh	269sh,314,379	283,329	294,338sh
152	花旗松素	290,327sh	246sh,326	280sh,312,315	312,375	289sh,327	292,337sh
153	落新妇甙	292,327sh	246,328	238,316,375sh	287sh,314,378	290sh,329	294,335sh
154	双氢刺槐亭	275,308	251,334	280,307,345sh	275,307	257sh,280,333	278,312sh
	查尔酮类						
155	2-羟查尔酮	243,284,344	242,283sh, 322sh,436	238,286sh,348	239,281sh,347	282sh,345	281sh,345
156	4′-羟查尔酮	224,318	267sh,296,380	227,318	227,318	267sh,302,375	320
157	2′-羟-4′-甲氧查尔酮	252sh,317, 342sh	249,279sh, 309,408	231sh, 241sh, 304sh, 324sh, 357,407	231sh, 243sh, 272sh, 308sh, 323sh,348,406	256sh,320, 343sh	260sh,320, 343sh
158	3,4-二羟查尔酮	265,316sh,365	267. 341sh,446	263sh,275, 332sh,413	265,365	265,377,443sh	272,327,401
159	2,2-二羟查尔酮	240sh,253, 309,369	244sh,276, 324,444	268,303sh, 339,392sh,440	263,303sh, 335,384,433	256sh,312, 371,457	256sh,311,373
160	2′,4-二羟查尔酮	250,278, 324sh,369	249,271,320, 433	247, 284, 301, 393,443	247,282, 326sh,383,437	249sh,275, 330sh,313, 443sh	253sh,277, 323sh,372
161	2′,3′,4′-三羟查尔酮	251sh,309sh, 340	258,298,394	236sh, 279sh, 306, 316sh, 332sh,401	238, 314, 328, 379	259,287sh, 297,389	308sh,350
162	2′,3,4-三羟查尔酮	246sh, 267, 320sh,384	246sh,275,448	288sh, 315sh, 375sh,514	273,395,447	273,339,402	277,332,414

续表

序号	化合物名称	紫外光谱数据(λ_{max}/nm)					
		MeOH	NaOMe	$AlCl_3$	$AlCl_3$/HCl	NaOAc	NaOAc/H_3BO_3
163	2,2′,4-三羟查尔酮	253,279sh,322,391	270,302,387sh,501	252,281,286sh,321sh,400sh,465	252,279,322,399sh,453	256sh,275sh,324,402,462sh	255sh,277sh,325,398
164	2′,4,4′-三羟查尔酮	258sh, 298sh,367	253sh, 280sh,319sh, 349sh,430	258sh, 321,382sh,423	319sh, 376sh,421	281sh, 340,350sh,393	286, 353sh,380,443,476sh
165	2′,3,4,4′-四羟查尔酮	239sh,266,319sh,379	251, 281, 344,441	254sh, 304sh,318,357sh,490	241sh, 275,318,384sh,427	257sh, 279sh,348,397	282, 328, 415,460sh,489sh
	噢哢类						
166	4′-羟噢哢	255,338sh,397,405sh	238sh,277,308sh,350sh 478	255,343sh,396,405sh	255,345sh,396sh,402	259,277sh,343sh,410,473	257sh,344,406
167	3′,4′-二羟噢哢	259,277,329sh,413	279,355sh,502	272sh,287,330sh,463	259,277,329sh,413	260sh,276,313sh,418,502	265sh,284,332,445
168	5,7-二羟噢哢	283,312sh	242sh,308,349sh	301,359	282,318sh	291,313,350sh	285,314sh
169	6,7-二羟噢哢	242sh,317,379,444sh	239sh, 279sh,304,320sh,430	261sh,267,318,413	244sh, 261sh,320,374	269,311,371sh,431	264,314,401
170	6-羟-4′-甲氧噢哢	252,298sh,373,389sh	242, 303sh,311,379sh,399	254,364,389	254,301sh,377	300sh,311,401	257sh,301sh,375
171	3′,4′,6,7-四羟噢哢(金鸡菊噢哢)	250sh, 271sh,340sh,412	247sh, 297sh,409sh,483	267, 286sh,383sh,458,603	255sh, 272sh,343sh,410	266sh, 321sh,385sh,438	264sh, 280sh,327sh, 369sh,445
172	大花金鸡菊噢哢	244sh, 257sh,269sh, 318sh,392sh,406	253, 273sh,383sh,402,468	259sh, 287,342,448	255sh, 270sh,325sh,404	266, 318sh,384sh,426	262,280,346sh,434
173	6-羟-3′,4,4′-三甲氧噢哢	251sh, 270sh,320sh, 378sh,395	242sh, 256sh,311sh,400	253, 273sh,336sh,396	251, 271sh,327sh,395	247sh, 311sh,402	271sh, 313sh,396
174	3-羟-4,4′,6-三甲氧噢哢	251sh, 268,329sh,396	243sh, 289,337sh,378,435	251sh, 268,336sh,397	251sh, 268,329sh,397	269,328,396	269sh, 329sh,398

① 表中数据引自文献[6]。sh——肩峰。

(三) 香豆精类化合物的紫外吸收光谱

表 13-19 香豆精类化合物的紫外吸收光谱数据①

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm (lgε)
香豆精	(香豆精母核结构式, 位置编号 1–8)	270(4.03),312(3.78)
5-乙酰氧基香豆精	$5\text{-}O{-}\overset{O}{\overset{\Vert}{C}}{-}CH_3$	281(4.10),312sh
5-甲基香豆精	5-CH_3	275(4.04),287(4.06),312sh
5-甲氧基香豆精	5-OCH_3	242(3.81),298(4.11)
5-羟基香豆精	5-OH	250(3.79),298(4.01)
6-乙酰氧基香豆精	$6\text{-}O{-}\overset{O}{\overset{\Vert}{C}}{-}CH_3$	275(4.01),320(3.66)
6-甲基香豆精	6-CH_3	278(4.07),320(3.74)
6-甲氧基香豆精	6-OCH_3	230(4.25),278(4.06),342(3.69)
6-羟基香豆精	6-OH	230(4.22),280(4.03),345(3.65)
7-乙酰氧基香豆精	$7\text{-}O{-}\overset{O}{\overset{\Vert}{C}}{-}CH_3$	280(4.01),313(3.99)
7-甲基香豆精	7-CH_3	285(4.04),315(3.95)
7-甲氧基香豆精	7-OCH_3	325(4.33)
7-羟基香豆精	7-OH	326(4.27)
5,7-二乙酰氧基香豆精	$5,7\text{-}二{-}O{-}\overset{O}{\overset{\Vert}{C}}{-}CH_3$	289(4.05),320sh

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
5,7-二甲氧基香豆精	5,7-二 OCH_3	246(3.88),323(4.20)
5,7-二羟基香豆精	5,7-二 OH	258(3.85),333(4.18)
6,7-二乙酰氧基香豆精	6,7-二—O—C(=O)—CH_3	278(4.16),318(3.84)
6,7-二甲氧基香豆精	6,7-二 OCH_3	229(4.27),245(3.89),293(3.82),345(4.12)
6,7-二羟基香豆精	6,7-二 OH	230(4.09),258(3.73),299(3.73),350(4.01)
7,8-二乙酰氧基香豆精	7,8-二—O—C(=O)—CH_3	282(4.10),315sh
7,8-二甲氧基香豆精	7,8-二 OCH_3	257(3.57),316(4.22)
7,8-二羟基香豆精	7,8-二 OH	263(3.89),290(3.88),330(4.04)
4-甲基-7-羟基香豆精	4-CH_3,7-OH	230sh (4.0), 280sh (3.7), 325(4.05)
4-甲基-5-羟基香豆精	4-CH_3,5-OH	250(4.0),295(4.15)
4-甲基-6-羟基香豆精	4-CH_3,6-OH	230(4.55),275(4.18),340(3.72)
4-羟基香豆精	4-OH	240sh(4.0),290(4.2),296(4.18)
3-羟基香豆精	3-OH	240(3.75),270sh(3.70),330(4.0)
3-甲基-4-羟基香豆精	4-OH,3-CH_3	243(3.95),320(4.15)
3-甲基-6-甲氧基香豆精	3-CH_3,6-OCH_3	225(4.3),276(4.0),340(3.70)
3-甲基-7-甲氧基香豆精	3-CH_3,7-OCH_3	240sh (3.6), 290sh (3.8), 320(4.20)
4-甲基-8-甲氧基香豆精	4-CH_3,8-OCH_3	218 (4.20), 283 (4.10), 292sh(4.08)
菲巴芬辛	7-OCH_3,8-CH(—O—)CH—C(=CH_2)CH_3	235sh (3.71), 246 (3.66), 250(3.70),322(4.18)
蛇床内酯	7,8-O—C(CH_3)(CH_3)—CH(CH_2—)—O—C(=O)—C(=CH_2)—CH_3	220(4.30),246(3.47),256(3.38),326(4.13)
阿魏内酯 A	7-O—CH_2—R	250(3.34),298sh(3.94),324(4.2)
马明内酯	7-O—CH_2—CH=CH—CH_2CH_2—CH(OH)—C(OH)(CH_3)—CH_3	243(3.01),253(3.42),342(4.23)
阿魏内酯 B	7-O—CH_2—R	242(3.60),252(3.48),298(3.93),326(4.18)
阿魏内酯 C	7-O—CH_2—R	243sh (3.58), 254 (3.42), 298sh(3.97),327(4.24)
诺他林	7,8-O—C(CH_3)(CH_3)—C(CH_2—)—O—C(=O)—CH=C(CH_3)CH_3	219(4.83),246(3.83),256(3.73),326(4.16)
罗麻亭	7,8-O—C(CH_3)(CH_3)—CH(OH)—CH_2—	246(3.78),257(3.56),329(4.11)
凯内酯	7,8-O—C(CH_3)(CH_3)—CH(OH)—CH(OH)—	213 (4.13), 219.5 (4.10), 246(3.84),258(3.95),325(4.14)
橙皮油内酯	7-OCH_3,8—CH_2—CH(OH)—C(=CH_2)CH_3	245(3.56),256(3.57),320(4.10)
普里克生	7,8-O—C(CH_3)(CH_3)—CH(O—C(=O)—CH_3)—CH(—)—O—C(=O)—C(CH_3)=C(H)CH_3	218sh (4.31), 244sh (3.71), 255(3.60),300sh(3.92),323(4.11)

续表

化合物名称	取　代　基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
苏斯克多芬	7,8-O—C(CH₃)(CH₃)—CH(O—C(=O)—CH₃)—CH(O—C(=O)—CH₂—CH(CH₃)₂)—	219(4.05),234sh(3.52),245(3.52),255(3.46),300sh(3.88),323(4.07)
阿它董亭	7,8-O—CH—CH—O—C(=O)—CH₂—CH(CH₃)₂; H₃C—C(CH₃)—O—C(=O)—CH₂—CH(CH₃)₂	217sh(4.18),322(4.17)
前胡香豆精	7,8-O—CH—CH₂—; O—C(=O)—C(CH₃)=CH—CH₃; CH₃—C(CH₃)—O—C(=O)—C(CH₃)(CH₃)—CH—CH₃	208(4.00),217sh(4.8),250(3.87),261(3.87),326(4.19)
沙米丁	7,8-O—C(CH₃)(CH₃)—CH—CH—O—C(=O)—CH₃; O—C(=O)—CH=C(CH₃)₂	327(4.17)
迪叩生	6,7-CH₂—CH—C(CH₃)(CH₃)—O—; O—C(=O)—CH=C(CH₃)₂	330
去氧布鲁内酯	5,7-—OR,6-R	217(4.44),235sh(4.08),253(3.71),261(3.70),331(4.24)
哥伦比亚内酯	7,8-O—CH—CH₂—; (CH₃)₂C—O—C(=O)—C(CH₃)=C(CH₃)₂	219(4.35),250(3.56),261(3.59),327(4.19)
哥伦比亚苷	7,8-O—CH—CH₂—; (H₃C)₂C—O—Glu	216(3.97),250(3.50),261(3.70),327(4.00)
3-(1,1-二甲基戊烯)-勒尼宁	3-C(CH₃)(CH₃)—CH=CH₂,7-OCH₃	216(4.11),251sh(3.36),295(3.96),321(4.25)
潼帕伐灵	7-O—CH₂—CH=C—C(O—C(CH₃)(CH₃)—C(=O)—CH)	215(4.27),236(4.08),300sh(4.37),315(4.39)
小芸米灵	6-CH(O—C(=O)—C(CH₃)(O)—CH),7-OCH₃	221(4.21),250sh(3.46),259sh(3.08),293sh(3.36),320(4.05)

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
蛇床丁	—O CH—CH—OH CH₃—C—O—C—CH₂—CH(CH₃)₂ CH₃ O (—O—CH—CH(OH)—; CH₃—C(CH₃)—O—C(=O)—CH₂—CH(CH₃)₂)	246 (3.52), 258 (3.49), 323 (4.18)
维斯纳丁	$-O-C(CH_3)_2-CH-CH(O-C(=O)-CH_3)-$ $O-C(=O)-CH(CH_3)-CH_2-CH_3$	323(4.14)
塔木奴斯明	6-CH—CH (环氧, O), 7-OCH_3 $C(=CH_2)-CH_3$	227, 253sh, 297, 327
8-异戊烯-7-氧-异戊烯基香豆精	$7-O-CH_2-CH=C(CH_3)_2$; $8-CH_2-CH=C(CH_3)_2$	258, 324
高紫白芷素	$-O-C-CH$ $O-C(=O)-C(CH_3)=CH-CH_3$ $H_3C-C(CH_3)-O-C(=O)-C(CH_3)=CH-CH_3$	216sh (4.5), 246sh (3.07), 258 (3.55), 301sh(3.95), 322(4.14)
爱得尔亭	7,8-O—CH—CH— $O-C(=O)-C(CH_3)=CH-CH_3$ $H_3C-C(CH_3)-O-C(=O)-CH_3$	219 (—), 248 (—), 259 (—), 299sh(—), 323(—)
蛇床内酯醇	7,8-O—CH—CH(OH)— $H_3C-C(CH_3)-OH$	219 (4.26), 250 (3.69), 261 (3.67), 328(4.24)
前胡内酯醇	7,8-CH_2—CH—O— $H_3C-C(CH_3)-OH$	212 (3.89), 248 (3.50), 335 (4.09)
9-乙酰氧基-氧-乙酰二氢奥洛赛洛	7,8-O—CH—CH— $O-C(=O)-CH_3$ $H_3C-C-CH_3$ $O-C(=O)-CH_3$	318

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
9-乙酰氧基-氧-异戊酰二氢奥洛赛洛	7,8-O—CH—CH— H₃C—C—CH₃ (C 连 O—C(=O)—CH₃) O—C(=O)—CH₂CH(CH₃)₂	244,256,319
9-乙酰氧基-氧-刘寄奴草酰二氢奥洛赛洛	7,8-O—CH—CH— C　O—C(=O)—CH₃ O—C(=O)—CH=C(CH₃)₂	244,256,297,319
二氢奥洛赛洛	7,8-O—CH—CH₂— HO—C—CH₃ CH₃	210(4.28),218sh(4.14),252(3.33),262(3.39),328(4.16)
二氢沙米丁	7,8—O—C(CH₃)(CH₃)—CH—CH— O—C(=O)—CH₃ O—C(=O)—CH₂—CH(CH₃)₂	249(3.65),260(3.75),324(4.17)
海里亭	3-C(CH₃)(CH₃)—CH=CH₂,6,7—CH₂—CH—O— CH₃—C—CH₃ OH	330(4.30)
芸香内酯	3-C(CH₃)(CH₃)—CH=CH₂,6-CH₂—CH=C(CH₃)(CH₃)	222(4.30),254sh(3.71),297sh(3.97),330(4.29)
4-甲氧基-5-甲基-7-羟基香豆素	7-OH 4-OCH₃,5-CH₃,7-OH	225,290,309,320
白报春内酯	3,4-C(CH₃)(CH₃)—C(CH₃)(H)—O— 5-CH₃,6-OH	213,296,310,340
8-甲氧基-芸香内酯	3-C(H₃C)(CH₃)—CH=CH₂,6-CH₂—CH=C(CH₃)(CH₃) 7-OH,8-OCH₃	230sh(4.45),262(3.99),308(4.13),340(4.35)
布鲁赛内酯	5,7-二 OR,6-R	218(4.43),235(4.02),254(3.69),260(3.69),330(4.13)
九里香内酯	5,7-二 OCH₃,8-CH₂—CH(OH)—C(OH)(CH₃)—CH₃	252(4.09),260(4.14),326(4.26)

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
5,7-二甲氧基-8-(3-甲基-2-酮丁基)香豆精	5,7-二 OCH_3 $8\text{-}CH_2\text{—}C(=O)\text{—}CH(CH_3)\text{—}CH_3$	207,252,261,327
芸香灵	5,7-二 OCH_3,$8\text{-}C(CH_3)_2\text{—}CH\text{=}CH_2$	217 (4.45), 256sh (3.99), 263 (4.01),330(4.20),
二氢芸香灵	5,7-二 OCH_3,$8\text{-}C(CH_3)_2\text{—}CH_2\text{—}CH_3$	217 (4.45), 256sh (3.99), 263 (4.01),330(4.20)
九里香烯内酯	5,7-二 OCH_3,$8\text{-}CH_2\text{—}CH\text{=}C(CH_3)_2$	221 (4.19), 239 (3.77), 263 (3.99),329(4.09)
异芸香灵	5,7-二 OCH_3,$8\text{-}C(CH_3)\text{=}C(CH_3)_2$	255 (4.24), 263 (4.06), 333 (4.18)
环芸香灵	$5\text{-}OCH_3$,$7,8\text{-}O\text{—}CH(CH_3)\text{—}C(CH_3)(\text{—})\text{—}CH_3$	227(4.17),241sh(3.86),258sh (3.96),265(4.11),345(4.15)
西必果辛	5,7-二 OCH_3,$8\text{-}CH_2\text{—}\underset{\text{O}}{CH\text{—}C}(CH_3)_2$	240(3.76),252sh(3.92),259sh (3.98),327(4.14)
5-牻牛儿烷氧基-7-甲氧基香豆精	$5\text{-}O\text{—}C_{10}H_7$,$7\text{-}OCH_3$	247 (3.85), 256 (3.85), 327 (4.18)
莨菪亭	$6\text{-}OCH_3$,7-OH	230 (4.18), 255 (3.71), 261sh (3.68),299(3.76),347(4.08)
6-羟基-7-甲氧基香豆精	6-OH,$7\text{-}OCH_3$	231 (4.25), 255 (3.80), 259sh (3.78),297(3.81),349(4.06)
普林勒亭	6-OH,$7\text{-}O\text{—}CH_2\text{—}CH\text{=}C(CH_3)_2$	231 (4.26), 256 (3.81), 260sh (3.80),298(3.86),350(4.12)
洋椿香素	$6\text{-}OCH_3$,7-OH,$8\text{-}CH_2\text{—}CH\text{=}C(CH_3)_2$	209,340
柯鲁拉亭	6-CHO,$7\text{-}OCH_3$	256 (4.17), 308 (3.87), 331 (3.89)
柯替卡香素	6,8-二 OCH_3,7-OR	294(4.01),337(3.82)
柯尼奥香素 B	$6\text{-}OCH_3$,7-OH,8-R	209(4.56),346(4.11)
赫普奥平	$6\text{-}C(=O)\text{—}R$,$7\text{-}OCH_3$	202 (4.54), 256 (3.68), 308 (3.35),331(3.40)
拉香豆素	$5\text{-}O\text{—}CH_2OH\text{=}CH_2$,7-OH	250,330
香豆素硫醚	$4\text{-}SCH_3$,$5\text{-}CH_3$	258,267,292,303
普劳灵 B	3,4,8-三 OCH_3,5-CHO,6-OH	215 (4.35), 240 (4.11), 307 (4.26)

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
邪蒿香醛	5,7-二 OCH_3,8-CH_2—C(CH_3)(CH_3)—CHO	240,257,263,330
邪蒿香醇	5,7-二 OCH_3,8-CH_2—CHOH—C(=CH_2)—CH_3	240,254,263,331
枇劳西醛	3-R,4-OH,5-CHO	257(3.93),307(3.74),376(3.82)
坡西马灵	7-O—CH_2—CH(O)C(CH_3)—CH_3 (环氧)	216(4.14),235(3.57),246(3.60),256(3.61),320(4.19)
	8-CH_2—CH(O)C(CH_3)—CH_3 (环氧)	
4,6,7-三甲氧基-5-甲基香豆素	—	225(4.30),275(3.94),287(4.10),313(4.17),327(4.04)
九里香甲素	5,7-二 OCH_3,8-CH_2—CH(OH)—C(OH)(CH_3)—CH_3	253(4.05),260(4.09),325(4.17)
九里香乙素	7-OCH_3,8-CH—OH—CH(OH)—C(=CH_2)—CH_3	248(3.64),258(3.68),320(4.24)
奥柏里嗪	6,7-O—CH(CH(H_3C)=CH_2)—CH_2—O—	208(4.3),252(3.75),230(4.0),295(3.7),341(3.8)
3-(1,1-二甲基丙烯基)-7,8-二甲氧基香豆精	3-C(CH_3)(CH_3)—CH=CH_2,7,8-二 OCH_3 5-OCH_3,6-OH	237sh(3.71),247sh(3.69),257(3.76),328(4.23)
尼松香素	7,8-O—CH(CH_3)—C(CH_3)(—)—CH_3	230(4.18),251(3.64),258(3.55),340(4.08)
沙巴豆香素	5,8-二 OCH_3,6,7-O—CH_2—O—	228(4.36),242sh(4.30),328(4.26)
当归香素	5-OCH_2—CH=C$(CH_3)_2$,7-OCH_3	
	8-C(=O)—CH=C(CH_3)—CH_3	208(4.47),222(4.19),250(4.30),321(4.28)
芹香素	6-CH_2—CH=C$(CH_3)_2$ 7-OH,8-OCH_3	260(3.05),325(3.58)
芹香素甙	—	245(4.15),280(4.59),295(4.56),320(4.27)
凤仙香素	3,6-二 CH_2—CH=C(CH_3)—CH_3 7-OH	219(4.16),250(3.64),258(3.56),334(4.23)

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
补骨脂内酯		245(4.45),290(4.10),320(3.8)
佛手内酯	5-OCH_3	250(4.38),306(4.03)
普兰告拉灵	5-O—CH_2—CH—C(CH_3)$_2$（CH 与 C 之间以 O 成环氧）	222 (4.48), 249 (4.31), 313 (4.25)
5-(3,6-二甲基-6-甲酰基-2-庚烯氧基)-补骨脂内酯	5-O—CH_2—CH=C(CH_3)—CH_2—CH_2—C(CH_3)(CHO)—CH_3	242 (4.35), 249 (4.40), 258 (4.35),267(4.38),307(4.28)
柏卡木亭	5-O—$C_{10}H_{17}$	245sh (4.22), 251 (4.27), 260 (4.21),268(4.20),310(4.15)
异芙波拉托林	5-O—CH_2—CH=C(CH_3)$_2$	223 (4.37), 243 (4.19), 250 (4.19),259(4.14),268(4.13),310 (4.09)
氧化前胡内酯	5-O—CH_2—CH(OH)—C(OH)(CH_3)$_2$	222 (4.35), 250 (4.22), 259 (4.18),269(4.20),310(4.15)
海拉克宁	8-O—CH—C(CH_3)$_2$（CH 与 C 之间以 O 成环氧）	250(4.31),305(4.02)
8-牻牛儿烷氧补骨脂内酯	8-O—CH_2—CH=C(CH_3)—CH_2—CH_2—CH(CH_3)$_2$	215 (4.51), 248 (4.42), 298 (4.13)
芙波拉托林	8-O—CH_2—CH=C(CH_3)$_2$	245sh (4.31), 250 (4.33), 264 (4.11),301(4.05)
帕布拉林酮	8-O—CH_2—CO—CH(CH_3)$_2$	219 (4.39), 250 (4.38), 300 (4.09)
西萝夫宁	3-C(CH_3)$_2$—CH=CH_2（H_3C, CH_3, CH_2）	246 (4.37), 292 (4.09), 326 (3.92)
豆蔻内酯	3,4-（亚甲二氧基苯基并环结构）	~240 (3.10), 295 (2.5), 350 (2.95)
花椒毒内酯	8-OCH_3	219 (4.48), 245sh (4.44), 249 (4.46),301(4.16)
异茴香内酯	5,8-—OCH_3	208 (4.16), 242 (4.16), 269 (4.27),273sh(4.27),312(4.10)
珊瑚菜内酯	5-OCH_3,8-O—CH_2—CH=C(CH_3)$_2$	242 (4.14), 249 (4.14), 269 (4.26),273sh(4.26),313(4.00)
5-牻牛儿烷氧基-8-甲氧基-补骨脂内酯	5-O—$C_{10}H_{17}$,8-OCH_3	250 (4.19), 268 (4.28), 312 (4.07)
5-羟基-8-甲氧基-补骨脂内酯	5-OH,8-OCH_3	224 (4.31), 241 (4.11), 248 (3.99),268sh(4.16),270(4.21),316(3.98)

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
5-甲氧基-8-羟基-补骨脂内酯	5-OCH_3,8-OH	241sh(4.01),250sh(3.96),273(4.28),317(4.00)
5-(2',3',-二羟基-3'-甲基丁基)-8-甲氧基-补骨脂内酯	5-CH_2—CH(OH)—C(OH)(CH_3)—CH_3,8-OCH_3	220,~240,251,266,309
呋喃品纳灵	5-OCH_3,8-C(CH_3)$_2$—CH=CH_2	233(4.12),254(3.96),273(3.97),316(3.81)
5-(2,3-环氧-3-甲基丁基)-8-甲氧基补骨脂内酯	5-CH_2—CH—C(CH_3)$_2$ (2,3-环氧, O 桥接 CH 与 C),8-OCH_3	221,244sh,251,266,305
海佛地宁	3,5-—OCH_3,4-O—C(CH_3)$_2$—CH=CH_2	247(4.48),288(3.81),342(3.46)
蛇床香素	5-O—CH_2—CH=C(CH_3)$_2$,8-OCH_3	223(4.36),242(4.11),249(4.12),270(4.20),313(4.02)
比克白芷内酯	5-OCH_3,8-O—CH_2—CH—C(CH_3)$_2$ (O 桥接 CH 与 C)	223(4.36),242(4.11),249(4.11),268(4.27),313(4.03)
异补骨脂内酯		248(4.40),295(4.10),~320sh(3.7)
奥罗赛洛		217sh(4.21),251(4.44),301(4.04)
异佛手内酯	5-OCH_3	250(4.29),305(4.01)
异白芷内酯	6-OCH_3	248(4.38),313(3.87),340(3.77)
茴香内酯	5,6-—OCH_3	252(4.44),304(4.03)
6-异戊烯氧基-异佛手内酯	5-OCH_3,6-O—CH_2—CH=C(CH_3)$_2$	221,252,304
阿米灵		248(3.55),260(3.65),302(4.17)
3-二甲烯丙基补骨脂素	3-C(CH_3)$_2$—CH=CH_2	246(4.46),293(4.14),330(4.0)
马米香素	8-O—C(CH_3)$_2$—CH=CH_2	225(4.30),252(4.13),261(4.10),269(4.09)
异当归白芷内酯		204(4.34),222(4.03),245(3.61),255(3.56),296(3.86),327(4.19)
桃花心木香素	8-CO—C(CH_3)$_3$	232(4.47),239(4.42),267(4.15),277(4.15),302(3.92)
5-香叶烷氧基补骨脂素	5-CH_2CH=C(CH_3)—$CH_2$$CH_2$CH=C($CH_3$)$_2$	248(4.28),266(4.06),302(4.00)

续表

化合物名称	取代基	吸收带 λ_{max}^{EtOH}/nm(lgε)
8-二甲烯丙氧基佛手内酯	5-OCH_3,8-O—C(CH_3)$_2$—CH═CH_2	222 (4.50), 249 (4.30), 265 (4.30),306(4.10)
达木坦宁	5-CHOH—CHOH—C(CH_3)$_2$—OH,8-OCH_3	222 (4.49), 250 (4.36), 264 (4.29),308(4.14)
塔齐佛林	5-OH,8-CH_2—CH═C(CH_3)$_2$	223,278,339
3-(1,1-二甲基烯丙基)-8-(3,3-二甲基烯丙基)-花椒内酯	3-C(CH_3)$_2$—CH═CH_2,8-CH_2—CH═C(CH_3)$_2$	226sh (4.39), 265 (4.24), 335 (4.11)
黄皮香素	7-OCH_3,8-C(CH_3)$_2$—CH═CH_2	230 (4.24), 270 (4.36), 330sh (3.96)
去甲黄皮香素	7-OH,8-C(CH_3)$_2$—CH═CH_2	225(4.22),275—280(4.20),335 (4.04)
阿维西宁		250 (4.51), 257 (4.61), 301 (4.28)
7-羟基坡里宁		215 (4.43), 327 (3.81), 347 (3.69),367(3.86),387(3.67)
柯劳马灵		225 (4.12), 248 (3.59), 250 (3.49),298(3.89),332(4.83)
迪塔劳内酯		222 (4.17), 244 (4.37), 250 (4.47),294(4.37),297(4.38),309 (4.28),344(4.04)
环埃里香素		277 (4.10), 289 (4.00), 309 (3.82),323(3.65)
埃里香素		278 (4.10), 289 (4.00), 308 (3.82),323(3.70)
洛普林		251(4.36),290(4.32),340(4.03)
异埃里香素		275 (4.08), 288 (4.07), 308 (3.83),323(3.67)
前胡灵		222 (4.45), 247 (3.69), 258 (3.59),300(4.09),325(4.28)
前胡里定		220 (4.28), 246 (3.60), 257 (3.46),300(4.20),324(4.38)
前胡劳灵		220 (4.00), 246 (3.57), 257 (3.55),300(4.08),324(4.30)
白前胡甲素		215(4.47),255(3.69),323(4.17)
白前胡乙素		215 (4.48), 257 (3.89), 326 (4.29)

① 表引自文献[2]表12.1,12.2。

(四) 木脂素类化合物的紫外吸收光谱

表 13-20 木脂素类化合物的紫外吸收光谱数据①

名称	吸收带 λ_{max}/nm(lgε)	溶剂②
鬼臼脂素类		
鬼臼毒	205(4.76),290(3.63)	E
苦鬼臼毒	205(4.75),290(3.61)	E
闭花木质素	247(4.19),347(4.02)	E

续表

名　　称	吸收带 λ_{max}/nm(lgε)	溶剂[②]
山荷叶脂素苷	262(4.80),294(3.99),315(4.02),335(3.68)	E
山荷叶脂素	230(4.23),268(4.60),294(3.81),312(3.78),325(3.77),360(3.54)	E
海里吡辛	267(4.66),290(3.70),354(3.88)	E
索马榆脂酸	330.5(4.13)	E
α-去水鬼臼脂素	242(4.47),311(3.88)	E
γ-去水鬼臼脂素	245.5(4.31),350(4.10)	E
β-去水鬼臼脂素	290(3.69)	E
奥托肉豆蔻脂素	234(3.97),287(3.82)	E
奥托肉豆蔻酚脂素	234(3.95),287(3.82)	E
普甲卡酸	281(3.58),307(2.42)	E
4′-去甲基-去氧鬼臼脂素-β-D-葡萄糖苷	292(3.68)	E
去氧鬼臼脂素-1-β-D-葡萄糖苷酯	289(3.68)	E
4′-去甲基鬼臼脂素	286(3.66)	E
α-足叶草脂素	210(4.46),274(3.41)	E
β-足叶草脂素	210(4.76),273(3.26)	E
台湾脂素 C	217(4.30),223(4.29),251sh(4.60),257(4.64),2.94(3.99),305(3.96),350(3.70)	M
台湾脂素 E	230(4.20),263sh(4.30),269(4.30),290sh(3.80),308—313(3.73),322(3.76),357(3.45)	M
爵床脂素 C	260(4.68),265(4.71),300(3.91),317(3.98),355(3.55)	$CHCl_3$
爵床脂素 D	262(4.59),300(3.92),317(3.98),355(3.52)	$CHCl_3$
崖柏脂酚	264(4.59),312(3.89),323(3.88),365(3.69)	E
去羟基柏脂酚	259(4.36),315(3.88),356(3.64)	E
去氢鬼臼脂素	226(4.49),262(4.62),323(4.02),356(3.74)	E
新爵床脂素 A	264(4.69),298(4.01),319(4.03),355(3.47)	E
爵床脂素 A	265(4.35),295(4.13),315(4.13),355(3.33)	E
爵床脂素 B	260(4.52),295(4.13),310(4.13),350(3.41)	E
铁杉脂素	283(3.52)	E
阿特脂素	223(4.16),287(3.69),294sh(3.63)	E
奥斯特木脂素-1	244sh(3.91),288(3.70),293(3.68)	E
异苦鬼臼酮	235(4.36),259(4.02),318(3.81)	E
纽旭波苷	280(3.57)	E
奥托肉豆蔻酮	236(4.35),288(4.00)	—
普洛斯特定 A	230(4.43),255(4.86),300—305sh,(3.33),310(3.28),315(3.25),345sh(2.98)	M
松脂素类		
松脂素	237(3.91)287(3.86)	环氧六烷-水
花椒酯酚	233(4.04)283(3.84)	E
花椒脂内脂	237(3.61)287(3.60)	E
里立脂素	212(4.77)270(3.16)	E
新苦梓脂素	232(3.58)279(3.03)	E
胡麻脂素	236(3.93)293(3.89)	E
芝麻脂素	237(3.90)288(3.85)	E
波罗宁脂素	237(4.01)287(3.94)	E
透骨草脂素	236(4.20)295(4.00)	E
阿波特醇酯	237,287	M
阿波特内酯	238,287	M
爵床素林脂素	228(4.32),282(3.78)	M
辛普勒脂素	235(4.12),292(4.04)	—
斯品辛脂素	233,283	M
五味子素		
五味子甲素	218(4.80),248(4.27),280(3.68)	E
五味子乙素	218(4.70),256(4.19),280(3.81)	E
五味子丙素	218(4.70),256(4.09),280(3.88)	E
五味子醇甲	217(4.72),251(4.26),280(3.63)	E
五味子醇乙	217(4.71),251(4.15),280(3.68)	E
五味子酯甲	233(4.81),257(4.20),292(3.83)	E
五味子酯乙	217(4.74),255(4.14),297(3.71)	E
五味子双醇	216(4.75),255(4.19),292(3.79)	E
卡特苏灵 Ⅰ	230(4.42),254(4.05),278(3.54)	M
卡特苏灵 Ⅱ	231(4.48),255(4.02),280(3.50)	M
柯米辛 D	216(4.57),256(3.94),294(3.68)	M
柯米辛 A	218(4.88),253(4.30),281sh(3.76),290sh(3.57)	M

续表

名　　称	吸收带 λ_{max}/nm(lgε)	溶剂②
柯米辛 F	220(4.77),256sh(4.13),288(3.42)	M
柯米辛 J	214(4.70),248(4.15),276(3.53)	E

① 表引自文献[2]表 13.1,表 13.3,表 13.4。

② 表中溶剂代号含义同表 13-14。

（五）醌类化合物的紫外吸收光谱

表 13-21　醌类化合物的紫外吸收光谱数据①

化　合　物	吸收带 λ_{max}/nm(lgε)	溶剂②
2-异戊基对苯醌	243(4.28),315(2.87),440(1.52)	乙醚
2-甲基-5-异戊基苯醌	251(4.28),258sh(4.23),310(2.50)	E
2-甲基-5-牻牛儿基苯醌	250(4.35),257(4.28),308(2.43)	己烷
麝香草醌	276(3.41),252sh(3.39)	E
α-生育醌	261(4.38),269(4.29)	E
拉哥色醌 A(S)	257(4.25),310(2.55),435(1.55)	E
拉哥色醌 B(S)	268(4.10),412(2.98)	E
普斯托醌	254(4.31),261(4.34),314(2.93)	石油醚
植物普斯托醌	254,261	环己烷
柯地色醌 A	250(4.1),348(2.9)	E
柯地色醌 B	250(4.1),348(2.9)	E
柯地色醌 C	250(4.1),348(2.9)	—
植醌	261(4.2),314(2.5)	石油醚
弗鲁克力醌	234sh(4.47),281.5(4.00),329(3.9),377sh(3.5)	环己烷
普力明	267(4.33),365(2.54)	E
沙柯登醌酸	264(4.82),366(3.12)	E
端节醌	230sh(4.01),264(4.13),360(2.00)	E

续表

化 合 物	吸收带 λ_{max}/nm(lgε)	溶剂[2]
肖楠醌	230sh(4.15), 260 (4.27), 284sh (3.57), 363(2.98), 455 (2.61), 4.75 (2.5)	环己烷
扇力林醌乙醚	269.5(4.14), 404(2.76)	M
托拉醌	266(4.0), 415 (3.07)	M
柏力醌	206 (4.15), 266 (4.05), 412 (3.01)	E
羟基柏力醌	295 (4.25), 425(2.41)	E
去羟赫力柯巴西醌	274 (4.11), 404(3.02)	E
红醌	268 (4.52), 406(3.36)	$CHCl_3$
扇力林醌	272 (4.05), 406(2.07)	$CHCl_3$
莫索醌 B	226 (3.86), 272 (3.69), 408 (2.40)	E
4'-羟基-4 甲氧基黄檀醌	228 (4.10), 262 (4.12), 330 (3.22)	—
4-甲氧基黄檀醌	260 (4.18)	—
4,4'-二甲氧基黄檀醌	228 (4.16), 258 (4.13), 333 (3.23)	—
报特拉醌	238 (4.36), 273 (4.20), 370 (3.95)	—
3,4-二甲氧基黄檀醌	260 (4.05), 405 (3.00)	—
赫维地醌	287 (4.33)	E
波文醌	287 (4.31)	E
珠沙根醌 B	291 (4.56), 420～428 (2.82)	E

续表

化合物	吸收带 λ_{max}/nm (lgε)	溶剂[②]
珠沙根醌 A	289 (4.66), 415～425 (2.83)	E
珠沙根醌 C	281 (4.40), 420 (2.87)	E
黄精醌	295 (4.32), 417 (2.33)	$CHCl_3$
杜茎山醌	295 (4.36), 440 (2.58)	E
赫力柯巴西醌	297 (4.15), 377 (2.61), 430 (2.47)	E
大叶杜茎山醌	295 (3.15)	E
维朗醌	290.5 (5.55), 295 (5.56), 416 (2.30)	二氧杂环己烷
欧斯色醌	287 (4.60), 435～450 (2.85)	E
阿米登醌	228 (4.45), 288 (4.45)	E
斯皮双醌	297 (4.35), 460 (2.29)	$CHCl_3$

化合物	吸收带 λ_{max}/nm(lgε)	溶剂[②]
乌比醌 $n=1\sim12$	275,405	E
X-二氢乌比醌	275(4.08)	E
沙草醌	259 (4.46), 347 (3.50), 473 (3.63)	E
四氢沙草醌	264 (3.66), 323 (4.36), 480 (2.10)	E
二氢沙草醌	275 (4.28), 334 (3.93), 463 (2.75)	E
羟基沙草醌	262 (4.62), 347 (3.49) 473 (3.62)	E
酸模醌	234 (4.71), 402(3.70)	二氧杂环己烷
猪苓醌	256 (4.63), 262 (4.63), 330sh (4.06) 465(2.60)	E
醌式红花苷	242,368,510	—

续表

化合物	吸收带 λ_{max}/nm(lgε)	溶剂[2]
柄苣醌	246 (3.85), 300 (4.09), 385 (4.47)	E
罗多醌	283 (3.99), 500 (3.34)	E
多米霉素 A	218 (4.24), 320 (4.02), 520 (2.72)	M
多米霉素 B	217 (4.39), 360 (4.36), 555 (2.32)	M
链霉醌	245, 375	M
阿它门醌	269 (4.40), 366 (3.64)	二氧杂环已烷
3-黑色麝香醌	267 (4.22), 285sh (3.88), 389 (3.17), 480sh (2.55)	—
特里酚酸醌	217(4.33), 264 (4.27), 305 (4.30), 390sh(3.43), 483 (3.86)	
落羽松双酮	320(4.40), 332 (4.40), 400 (3.30)	M
落羽松酮	316 (4.30)	M
落羽松醌	276(4.10), 408 (2.90)	—
姜黄醌	253 (4.02)	M
卡达里醌	241(4.11), 283 (3.90), 333 (3.70), 471 (3.07)	M
西门醌	233(4.41), 277 (4.10), 315 (4.18), 345 (4.09), 390 (3.89)	
信筒子醌	292.5 (4.24), 427 (2.53)	E
酸牛金醌	292.5 (4.24), 435 (2.42)	E
2-羟基-5-甲氧基-3-十五烷基对苯醌	289(4.21), 424 (2.65)	E

① 表引自文献［2］表 14.3。

② 表中溶剂代号含义同表 13-14。

第三节　紫外-可见分光光度计

测量紫外光，可见光光区吸光度的仪器目前仍以色散型的紫外-可见分光光度计为主。几十年来，随着光学和电子学技术的发展，仪器的测量精度、功能和自动化程度在不断地提高，但是以光源、单色器、样品室、检测器、放大和控制系统和显示系统等六个组件按直线排列方式组合的结构却仍基本不变。以微型电子计算机控制的紫外-可见分光光度计始于70年代中期，微型电子计算机不仅能够有控制光度计的操作、运行、自动调整工作参数、实现自动重复扫描、光谱累加、自动收集存储光谱等性能，还能够进一步对数据进行计算、求导和统计处理等，因而得到了迅速的发展。以微处理机控制的新一代的单光束自动扫描型分光光度计现已问世，它利用光电二极管阵列作检测器，具有快速扫描吸收光谱的特点，可代替结构复杂而操作繁琐的停流分光光度计。

在紫外-可见光谱区，傅里叶变换的应用受到理论和技术上某些因素的限制，进展较为缓慢。近年来傅里叶变换的紫外可见光谱仪的实验室仪器和商品仪器已相继推出，它将以其自身的优点和独特的应用价值受到人们的重视。

一、紫外-可见分光光度计结构概述

紫外-可见分光光度计是量度介质对紫外-可见光区波长的单色光吸收程度的分析仪器，按不同的分类标准所作的分类见表13-22。

表13-22　紫外-可见分光光度计的分类[5]

分类标准	分　类	分类标准	分　类
根据工作波段的不同分类	(1) 真空紫外分光光度计 (0.1nm～200nm) (2) 可见分光光度计 (350nm～700nm) (3) 紫外-可见分光光度计 (185nm～900nm) (4) 紫外-可见-近红外分光光度计 (185nm～2500nm)	根据同时提供的波长数不同分类 根据扫描速度的不同分类	(1) 单波长分光光度计 (2) 双波长分光光度计 动力学分光光度计
根据光度学和记录系统不同分类	(1) 单光束手动式分光光度计 (2) 双光束自动记录式分光光度计	根据是否分光分类	(1) 傅里叶变换紫外-可见光谱仪 (2) 色散型紫外-可见分光光度计

(一) 单光束分光光度计

单光束分光光度计只有单色器色散后的一束单色光，它是通过改变参比池和样品池的位置进行参比溶液和样品溶液的交替测量来测定样品溶液的吸光度。目前国内普遍应用的721型和751型的分光光度计就是属于这类仪器。该类仪器因光源强度波动和检测系统不稳定而能引起测量误差，故必须配备稳压电源。其优点是信噪比高，光学、机械及电子线路结构简单，价格便宜，适于在给定波长处测量吸光度，故常用于定量分析。图13-1为721型仪器结构示意图，图13-2为721型仪器光路系统原理图，图13-3为751型紫外-可见分光光度计光路系统示意图，图13-4为751型分光光度计结构示意图。

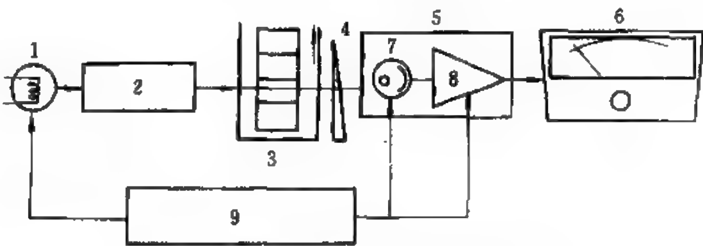


图13-1　721型分光光度计结构方块图

1—光源；2—单色器；3—吸收池；4—光量调节器；5—光电管暗盒；6—微安表；7—光电管；8—放大器；9—稳压电源

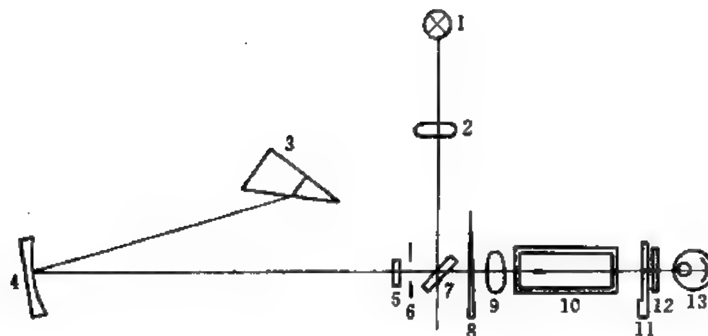


图 13-2　721 型分光光度计的光学系统

1—钨灯（12V，25W）；2—透镜；3—玻璃棱镜；4—准直镜；5、12—保护玻璃；6—狭缝；7—反射镜；8—光栏；9—聚光透镜；10—吸收池；11—光闸；13—光电管

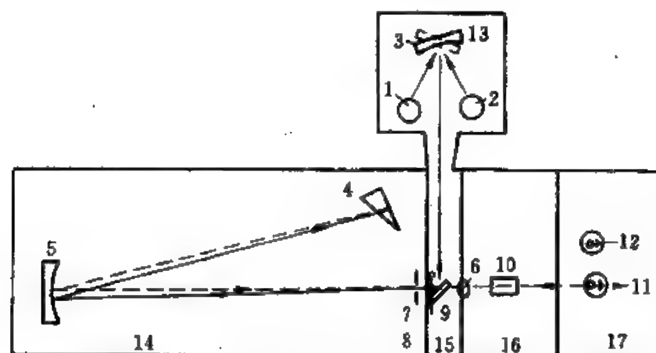


图 13-3　751 型分光光度计光学系统示意图

1—氢弧灯；2—钨灯；3—凹面反射镜；4—石英棱镜；5—准直镜；6—聚光镜；7，8—上下狭缝；9—平面反射镜；10—吸收池；11—蓝敏光电管；12—红敏光电管；13—光源室；14—单色器；15—滤光片架；16—样品室；17—光电管暗盒

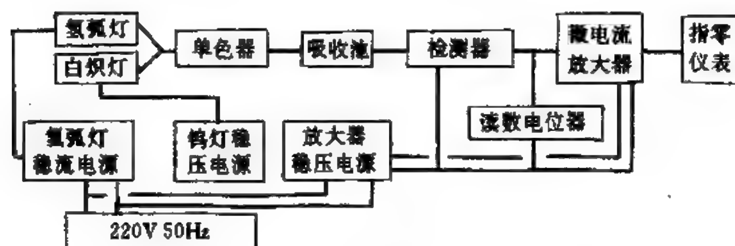


图 13-4　751 型分光光度计仪器结构方框图

（二）双光束自动记录式分光光度计

双光束分光光度计是将单色器色散后的单色光分成两束，一束通过参比池，一束通过样品池，一次测量即可得到样品溶液的吸光度。双光束分光光度计的特点是便于进行自动记录，由于样品和参比信号进行反复比较，消除了光源不稳定、放大器增益变化以及光学和电子学元件对两条光路的影响。该类仪器适合于结构分析，单色光分为两束的方法又有时间分隔和空间分隔两种。

时间分隔式双光束分光光度计结构见图 13-5。

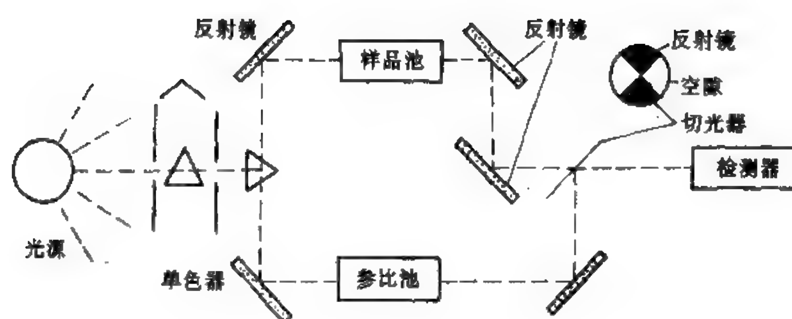


图 13-5 时间分隔式双光束分光光度计

单色器和样品室之间装置一切光器，使单色器射出的单色光转变为交替的两束光，分别通过参比池和样品池，然后将两透射光束聚焦到同一检测器，它交替接收两光路的光信号，检测器输出信号的大小决定于两光束强度差。

空间分隔式双光束分光光度计结构见图 13-6。

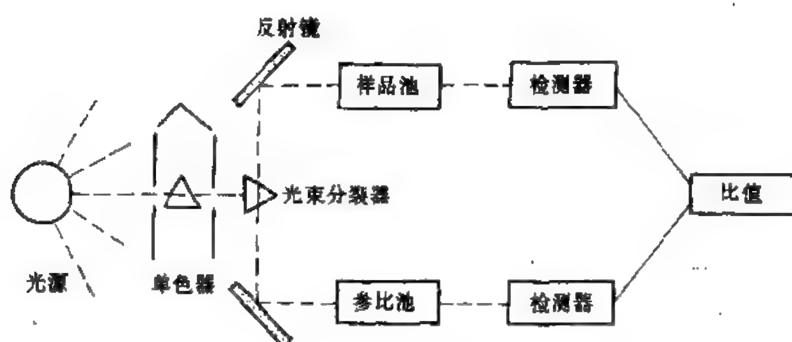


图 13-6 空间分隔式双光束分光光度计

它是利用光束分裂器和反射镜来获得两个分离光束，然后分别进入参比池和样品池，通常采用两个匹配得很好的检测器测量二光束强度之比。目前采用分时双光束形式的分光光度计较为普遍。

双光束分光光度计是自动记录仪器，其电子测量系统有两种类型：光学零位平衡式和电学比例记录式。在光学零位平衡式仪器中，来自样品和参比的信号直接输到伺服马达，当两者信号不等时，伺服马达带动位于参比光路中的光楔，使参比光束和样品光束达到平衡。在电学比例双光束系统中，斩波器置于样品池和参比池之前，将单色光调制成一定频率的断续光后交替通过样品池和参比池，然后在检测器中产生相应的样品信号和参比信号，由解调器将两个信号分开，并测量两信号的比例。

（三）双波长分光光度计

双波长分光光度计可同时提供两种不同波长的单色光，经切光器后，这两束光被分时交替照射于同一样品池，然后由检测器测量和记录样品溶液对波长 λ_1 和 λ_2 两条光束的吸收差 ΔA，国产 WFZ800—S 型双波长分光光度计光学系统见图 13-7。

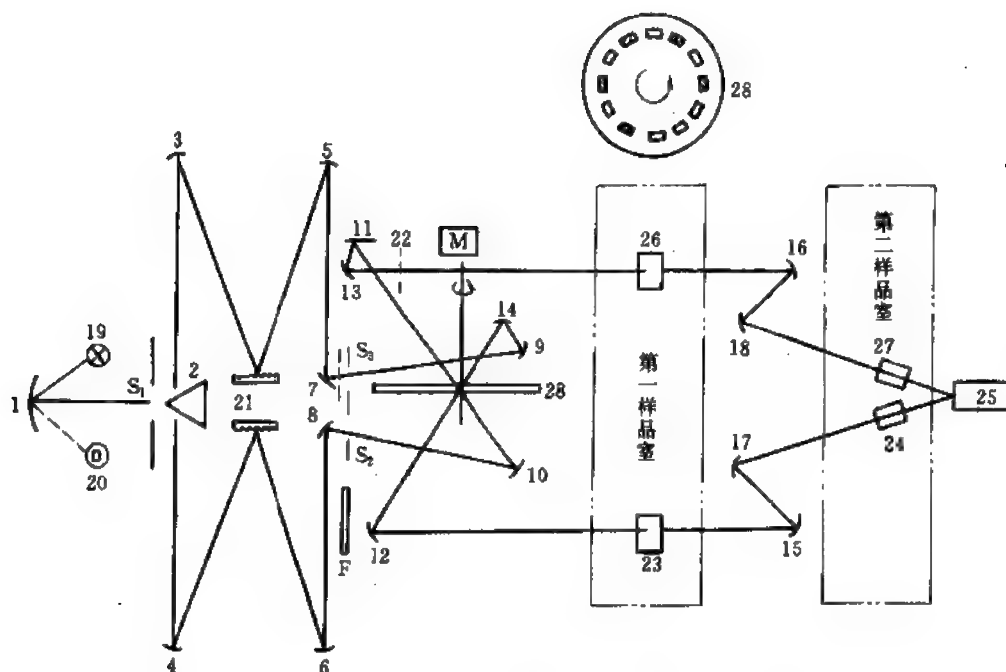


图 13-7 国产 WFZ800 S 型双波长分光光度计的光学系统

1～18—反射镜；19—溴钨灯；20—氢灯；21—光栅；22—挡光板；23，24—样品光路吸收池；25—光电倍增管；26，27—参比光路吸收池；28—旋转镜；S_1，S_2，S_3—进口和出口狭缝

一般双波长分光光度计可以双波长方式工作，亦可以单波长双光束的方式工作，两种方式工作时的简化光学系统分别见图 13-8(a)和图 13-8(b)。

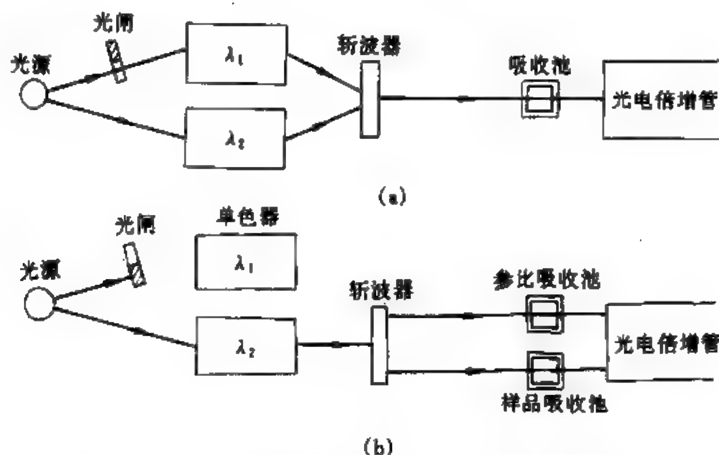


图 13-8 WFZ800S 型双波长分光光度计的简化光学系统图

(a) 以双波长方式工作时；(b) 以单波长双光束方式工作时

二、紫外-可见分光光度计组件

(一) 光源

用作紫外-可见分光光度计的光源应满足下列条件：

①在仪器的工作波段范围内可以发射连续光谱；

②具有足够的强度，其能量随波长变化小；

③稳定性好；

④使用寿命长。

表 13-23 列出了紫外-可见分光光度计中最常用的光源。

表 13-23 紫外-可见光源

光源	λ/nm	光子输出强度
氘灯	185～400	中等强度(是氢灯的 3～5 倍)，可使用到 350nm
卤(碘,溴)钨灯	250～2000	用玻璃灯壳时，320nm 以下无输出，欲使光源稳定，需使用很好的稳压电源
钨灯	320～2500	最好输出为(400～1200)nm，需要好的稳压电源
氙灯	180～1000	价高，不够稳定，在紫外-可见分光光度计中，用于研究光化学反应和快速反应动力学的激发光源
汞灯		用于波长的精确校正
(低压)	253.7(最强)	
(高压)	365、546 和 570(最强)	
(超高压)	上述谱线及(40～500)μm 连续光谱	
激光光源		
空心阴极光源		将原子吸收光谱仪代替分光光度计使用

（二）滤光片

滤光片是一种简单而廉价的波长选择器。滤光片的选用，必须根据滤光片与待测溶液为互补色的原则，见表 13-24。

表 13-24 滤光片的选择

溶液颜色	滤光片		溶液颜色	滤光片		溶液颜色	滤光片	
	颜色	λ/nm		颜色	λ/nm		颜色	λ/nm
青紫	绿黄	540～560	绿蓝	红	630～760	黄	蓝	440～450
蓝	黄	570～600	绿	紫	400～420	橙红	蓝绿	450～480
蓝绿	橙红	600～630	绿黄	青紫	430～440	红	绿蓝	490～530

常用滤光片种类及作用见表 13-25。

表 13-25 常用滤光片种类及作用

种类	作用	种类	作用
中性滤光片	作衰减片用，使光束强度均匀减弱	校正滤光片	用于校正分光光度计波长标度和吸光度标度
截止滤光片	用于截止杂散光或不需要的波长的光	(标准滤光片)	
通带滤光片	只让一定波长范围的光透过，在光栅分光光度计中，用以除去去高阶光谱	干涉滤光片	用以获得狭窄光谱带

（三）单色器

单色器是将光源发射的复合光分解为单色光并可从中分出任一波长单色光的光学装置。它由入射狭缝，准直装置（透镜或反射镜）、色散元件（棱镜或光栅）、聚焦装置（透镜或凹面反射镜）和出口狭缝五部分组成。

棱镜单色器结构材料的光学性质见表 13-26。

表 13-26 棱镜单色器结构材料的光学性质

材料	透光范围 λ/μm	折射率	角色散①	棱镜适用的范围 λ/μm	硬度和抗化学性
熔融石英	0.18～3.3	1.46	0.52×10^{-4}	0.18～2.7	优良
石英	0.20～3.3	1.54	0.63×10^{-4}	0.20～2.7	优良
燧（火）石玻璃	0.35～2.2	1.66	1.70×10^{-4}	0.35～2	优良
氟化钙（萤石）	0.12～12	1.43	0.33×10^{-4}	5～9.4	好
氟化锂	0.12～6	1.39	0.29×10^{-4}	2.7～5.5	不好

续表

材料	透光范围 λ/μm	折射率	角色散①	棱镜适用的范围 λ/μm	硬度和抗化学性
氯化钠	0.3~17	1.54	0.94×10^{-4}	8~16	不好
溴化钾	0.3~29	1.56	1.45×10^{-4}	15~28	不好
碘化铯	0.3~70	1.79		15~55	不好
KRS-5 (TlBr-TlI)	1~40	2.63		24~40	好

① 在 0.589μm 处的弧度数/μm。

棱镜单色器的构型常见的有四种（见图 13-9）：(a) 30°利特罗（Littrow）式，也称自准式；(b) 60°棱镜利特罗式；(c) 瓦兹渥斯（Wadsworth）式；(d) 泽尼特（Czernyturner）式。光栅单色器的构型也有四种（见图 13-10）：(a) 利特罗式；(b) 厄巴特（Ebert）式；(c) 泽尼特式；(d) 普芬特（pfundt）式。

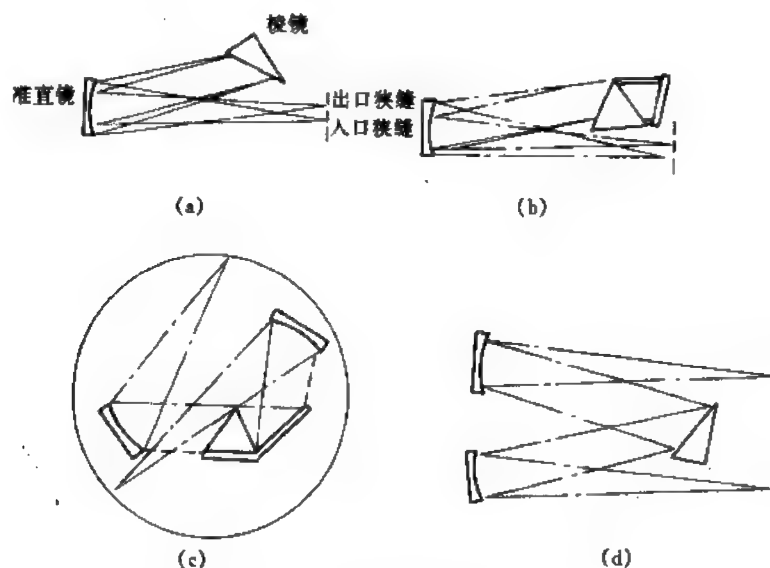


图 13-9　四种构型棱镜单色器的示意图

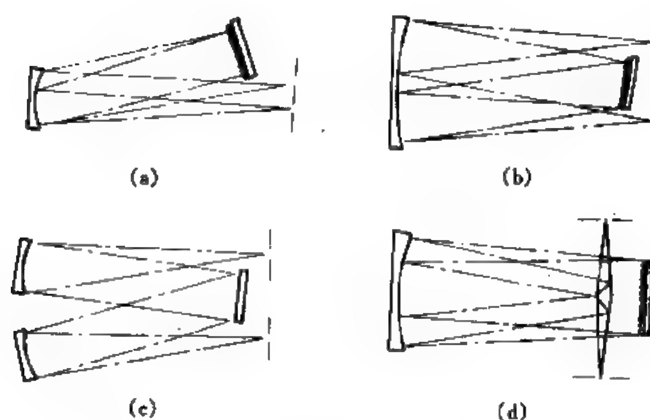


图 13-10　四种构型光栅单色器的示意图

（四）吸收池

吸收池主要有石英池和玻璃池两种，前者用于紫外区，后者用于可见和近红外区。根据

不同的需要还设计了一些特殊形式的吸收池见图 13-11。

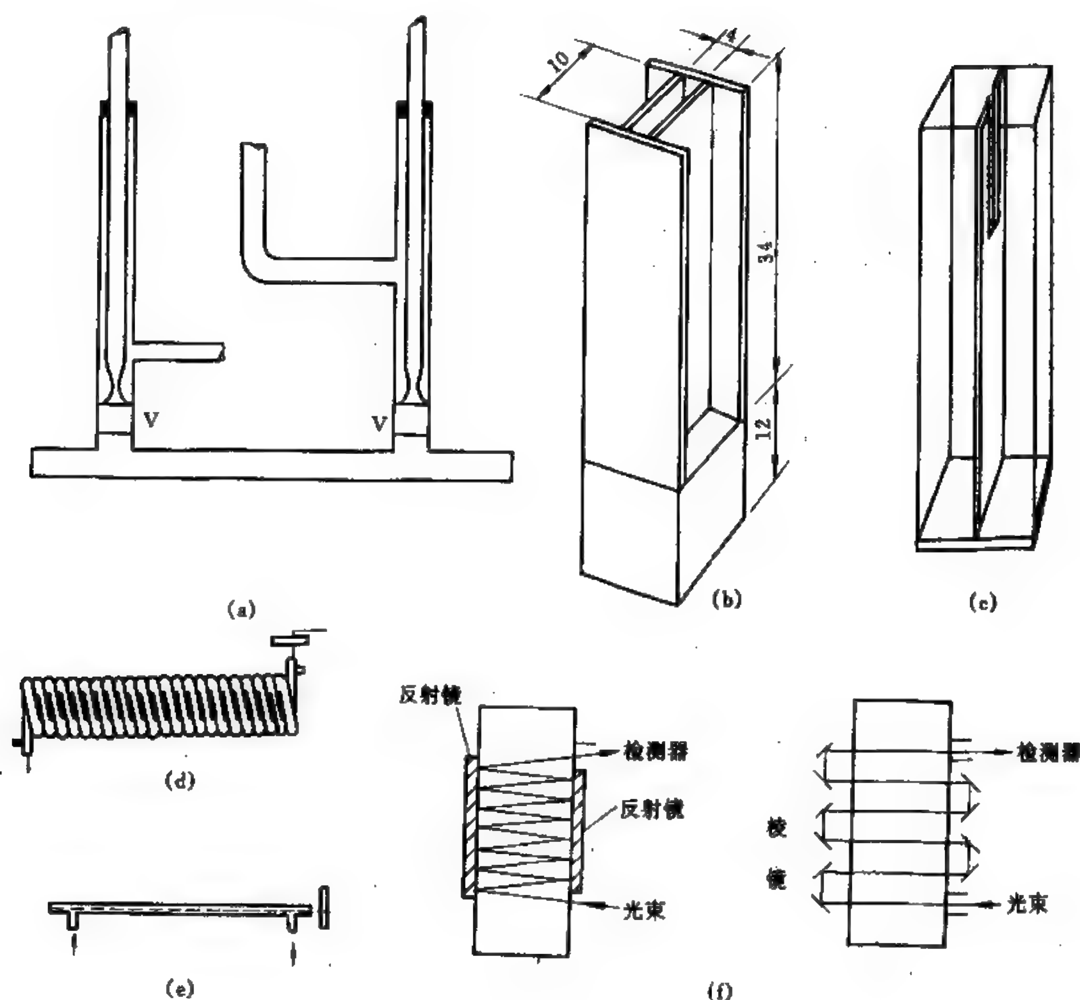


图 13-11　特殊形式的吸收池

(a) 气体紫外吸收池（V 旋塞活门）；(b) 双光路石英池（旋转 90°，光程由 4mm 变为 10mm）；(c) 分隔式吸收池；(d) 螺旋型长光路毛细吸收管；(e) 直线型长光路毛细吸收管；(f) 多次反射式吸收池

（五）检测器

在紫外-可见光区常用的检测器有光电池、光电管、光电倍增管、硅光电二极管检测器等，其特性列于表 13-27。

表 13-27　常用检测器特性

检测器	敏感元件	灵敏度	响应时间	使用波长 $\lambda/\mu m$	输出特性
光谱板	乳胶中卤化银微粒	高，与波长有关	慢	0.2～1.2	金属银沉积的密度
光电管	碱金属氧化物	高，与波长有关	快，<1μs	0.2～1.0	电流
光电倍增管	碱金碱氧化物，金属	很高，与波长有关	快，<1μs	0.16～0.7	电流
阻层光电池	二金属间的半导体	中等，与波长有关	快，<1μs	0.4～0.8	电流
光敏电阻	硫化铅或硒化铅	很高，与波长有关	中等，(100～1000)μs	0.7～4.5	电阻变化
热电偶	连接两种不同金属致黑化金属片结点	高	(50～100)ms	0.8～15.0	两金属接点处的电位差
红外线指示器	气体腔中的黑化膜	高	(3～30)ms	0.8～1000	电流

三、紫外-可见分光光度计的检定

对新制造、使用中（定期）和修理后的分光光度计都应进行检定，以保证其测试结果准确可靠。

中华人民共和国国家技术监督局批准颁布的各类紫外、可见及近红外分光光度计的检定规程有：

JJG 178—89　可见分光光度计检定规程

JJG 375—85　单光束紫外-可见分光光度计检定规程

JJG 682—90　双光束紫外-可见分光光度计检定规程

JJG 689—90　紫外、可见、近红外分光光度计检定规程

下面简要介绍各类分光光度计的检定方法。

（一）可见分光光度计的检定[1]

1. 技术要求：

（1）仪器的分类分级　仪器的性能按表 13-28 分类分级[2]。

表 13-28　可见分光光度计的类级与性能指标①

仪器类级（允许限 / 项目）		稳定度/%			波长准确度/nm					波长重复性/nm	透射比正确度/%	透射比重复性/%	杂散光/%		光谱带宽/nm	换挡偏差(A)
		零点	光电流	电压变动	(320)360至500	500至600	600至700	700至800	(800)至(1000)				$NaNO_2$	$NiSO_4$		
光栅式	1	±0.1	±0.3	±0.5	±1					相应波长准确度绝对值的一半	±0.8	0.2	0.3		6	±0.002
	2	±0.2	±0.5	±1.0	±2						±1.5	0.3	0.7		12	±0.004
	3	±0.3	±0.8	±1.5	±3						±2.5	0.5	1.2		20	±0.007
棱镜式	1	±0.2	±1.0	±1.0	±2	±3	±4	±5	±6		±1.5	0.3		2.0		±0.004
	2	±0.5	±1.5	±1.5	±3	±5	±6	±8	±10		±2.5	0.5		4.0		±0.007

① 数显仪器（在指标外）允许末位数变动±1。

（2）外观与初步检查

①仪器应有下列标志：仪器名称、型号、制造厂名、出厂时间及编号。

②仪器应能平稳置于工作台上，各紧固件均应紧固良好。各调节器、按钮、开关均能正常工作。电缆线的接插件均应紧密配合，接触良好。

③仪器样品架应推拉自如，无松动卡住现象，并能正确定位。各透光孔的透光量应一致。

④仪器指示器应显示清晰。刻线、数字等应粗细均匀、完整。指示线宽度不大于刻线宽度，并应与刻线平行。

⑤仪器处于工作状态时，光源发光应稳定无闪耀现象。当波长置于 580nm 处时，在样品室内应能看到完整、清晰、均匀的黄色光斑。

⑥仪器光谱范围的两端波长处（有灵敏度换挡开关的仪器可选在合适的灵敏度挡次），光

---

[1] 详见 JJG 178—89。

[2] 光谱带宽与换挡偏差不作为仪器定级的依据。

量调节系统在其调节范围的80%内调节时，应能使透射比达到100%。

数显仪器在光量调节系统调节至最高限时，透射比应大于125%。

⑦用检流计作指示器的仪器阻尼时间不得大于4s（其他类型仪器不检）。

⑧仪器所配吸收池的透光面应光洁，不应有划痕、斑点，任何一面不得有裂纹。

(3) 稳定度

①仪器零点在3min内漂移引起的透射比示值变化应符合表13-28要求。

②光电流在3min内漂移引起的透射比示值变化应符合表13-28要求。

③电源电压220V变动其±10%时，仪器透射比示值变化应符合表13-28要求。

(4) 波长准确度与波长重复性　仪器波长准确度与波长重复性应符合表13-28要求。

(5) 透射比正确度与透射比重复性　仪器的透射比正确度与透射比重复性应符合表13-28要求。

(6) 杂散光（杂散辐射率）　棱镜式仪器在420nm及700nm处杂散光应不大于表13-28要求。

光栅式仪器在380nm处杂散光应不大于表13-28要求。

(7) 光谱带宽　光栅式仪器光谱带宽应不大于表13-28要求。

(8) τ-A换挡偏差　带有τ-A转移的数显仪器，选择开关（或按键）换挡所引起的吸收比示值偏差应符合表13-28要求。

(9) 吸收池的配套性　配套使用的同一光径吸收池间的透射比之差（在440nm与700nm处）不得超过0.5%。

2. 检定条件

(1) 环境温度为（10～30)℃；相对湿度小于85%。

(2) 仪器检定处不得有强光直射；放置仪器的工作台应平稳。

(3) 仪器电源必须接地良好，没有强电磁场的干扰；对于用磁饱和稳压器的仪器，供给被检仪器的220V电源的频率为（50±0.5) Hz范围内的任一值，其稳定性用0.5%频率表监视时，不应有可察觉到的变化。

3. 检定方法

首先进行外观与初步检查。按仪器说明书要求，在工作状态下预热仪器后检定以下各项。

(1) 稳定度

①仪器在接收元件（光电池或光电管）不受光的条件下，用零点调节器将仪器调至零点，观察3min，读取透射比示值的变化，即为零点稳定度。

②仪器波长分别于仪器光谱范围两端往中间靠10nm处，调整零点后，打开光门，使接收元件受光。用光量调节系统的有关调节器或旋钮将仪器透射比调至95%（数显仪器调至100%）处，观察3min，读取透射比示值的变化，即为光电流稳定度。

③把仪器波长置于650nm处，将调压变压器接入外电源与仪器之间，用调压变压器输入220V电压，调节仪器透射比示值至95%（数显仪器调至100%)，然后将电压降至198V，记录仪器透射比的示值变化；再用调压变压器把电压调至220V，将仪器透射比仍调至95%（数显为100%）处，然后将电压升至242V，记录仪器透射比的示值变化，即为电压变动稳定度。

(2) 波长准确度与波长重复性

①对于波长准确度大于、等于2nm的仪器，按照被检仪器的光谱范围选择合适的干涉滤

光片（不少于 3 片），分别垂直置于样品室内的适当位置，并使人射光通过滤光片的有效孔径范围内。自短波向长波逐点测出滤光片的波长——透射比示值，求出相应的峰值波长 λ_i。连续测定 3 次。

②对于波长准确度小于 2nm 的仪器，用汞灯光谱线或氧化钬玻璃滤光片的吸收峰作参考波长[1]，从短波向长波方向对谱线进行测量，连续测量 3 次，记录波长测量值 λ_i。用汞灯的仪器仍需用镨钕滤光片在 528.7 及 807.7nm 处的吸收峰作参考波长，再次测量。

③波长正确度按下式计算：

$$\Delta_\lambda=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\lambda_i-\lambda_r \tag{13-2}$$

式中，λ_i 为各次波长测量值，nm；λ_r 为相应参考波长值，nm。

波长重复性按下式计算：

$$\delta_\lambda=\max\left|\lambda_i-\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\lambda_i\right| \tag{13-3}$$

波长准确度按下式计算：

$$U_\lambda=\Delta_\lambda\pm\delta_\lambda$$

式中，正负号的取用原则为与 Δ_λ 符号同向。

（3）透射比正确度与透射比重复性

①用透射比分别为 20%，40%和 70%左右的光谱中性玻璃滤光片，分别在 440，546，635nm 波长处，以空气为参比，分别测定各滤光片的透射比，连续测量 3 次（每次测定前允许对零点与 100%进行校正）[2]。按下式计算透射比正确度：

$$\Delta_\tau=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\tau_i-\tau_s \tag{13-4}$$

式中　τ_i——每一滤光片第 i 次透射比测定值；

τ_s——每一滤光片在相应波长下的透射比标准值。

②按下式计算透射比重复性：

$$\delta_\tau=\max\left|\tau_i-\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\tau_i\right| \tag{13-5}$$

式中，τ_i 为透射比 20%左右的滤光片在红光区的测定值。

（4）杂散光（杂散辐射率）

用 1cm 配套合格的吸收池。

光栅式仪器在 380nm 处，以蒸馏水为参比，测定 50.0g · L^{-1}的亚硝酸钠标准溶液透射比值（透射信号与该波长下的人射信号之比率），即为仪器在相应波长处的杂散光。

棱镜式仪器在 420nm 与 700nm 处，以 0.05mol 稀硫酸标准溶液为参比，测定饱和硫酸镍的 0.05mol 硫酸标准溶液透射比值，即为仪器在相应波长处的杂散光。

（5）光谱带宽

装上汞灯，将波长调节至 435.8nm 附近。调整仪器，测出此汞灯谱线的最高输出信号（用透射比值表示，下同）。然后将波长退回足量纳米数后由短波向长波方向移动，读取该谱

[1] 在表 13-29 所列汞谱线或表 13-30 氧化钬玻璃滤光片吸收峰波长中任选五条均匀分布的谱线作为参考波长（推荐用带▽的波长）。

[2] 自动吸液仪器采用 3 种浓度的紫外可见分光光度计用吸收比标准物质于 395nm 与 751nm 处测定，透射比正确度与透射比重复性计算方法相同。

线两侧输出信号为谱线最高输出信号一半的波长 λ_1 与 λ_2，则仪器光谱带宽

$$\Delta\lambda = |\lambda_1 - \lambda_2| \tag{13-6}$$

可变狭缝仪器可在最小狭缝挡测量。

(6) τ-A 换挡偏差

对于有 τ-A 转换的数显仪器，将波长置于 500nm 处，按仪器说明书的要求校正透射比与吸收比的转换后，调节光量调节系统的有关调节器或旋钮等，使透射比示值为 50.0，按下吸收比测量开关，吸收比的数值与 0.301 之差即为 τ-A 换挡偏差。

(7) 吸收池的配套性

仪器在其他项目检定合格后，把波长置于 440nm 处，在仪器所附的同一光径吸收池中分别注入含铬量 $30\mu g \cdot mL^{-1}$的重铬酸钾溶液；在仪器波长 700nm 处，分别注入蒸馏水。将其中一个池的透射比调至 95%（数显仪器为 100%）处，测量其他各池的透射比值。凡透射比之差不大于 0.5%的池可以配成一套使用。

仪器用户可根据实际使用波长（自行或要求计量部门）进行吸收池配套检定。必要时，可以在检定前事先清洗吸收池。

检定周期为半年，两次检定合格的仪器检定周期可延长为一年。在更换或修理影响仪器主要性能的零配件或单色器、检测器等或对测量结果有怀疑时应随时进行检定。

4. 检定设备及标准溶液配制方法

(1) 汞灯　发射光谱的谱线波长见表 13-29。

表 13-29　汞灯可见光谱的谱线波长数值及其近似强度①

λ/nm	相对强度② (A)	λ/nm	相对强度② (A)	λ/nm	相对强度② (A)
334.15	2	▽404.66	45	▽576.96	15
▽365.02	25	407.78	5	579.07	10
365.48	10	▽435.83	85	▽690.72	0.5
366.33	5	▽546.07	50		

① 带宽大于 0.5nm 的仪器不适于用 365.02nm 谱线，带宽大于 2.5nm 的仪器不适于用 365.02nm 及 576.96nm 谱线。

② 相对强度仅作参考。

(2) 氧化钬、镨钕和其他具有强吸收带的玻璃滤光片　波长标准器的波长值必须由波长准确度不大于 0.3nm 的分光光度计在常用的光谱带宽下标定（每半年一次）。吸收峰波长见表 13-30。

表 13-30　氧化钬玻璃吸收峰波长数值及其近似强度

λ/nm	近似强度 (A)	λ/nm	近似强度 (A)	λ/nm	近似强度 (A)
333.7	0.197	▽418.9	0.185	484.5	0.102

表 13-31 可见分光光度计检定用试剂

试剂名称	分子式	M_r	规格	试剂名称	分子式	M_r	规格
亚硝酸钠	$NaNO_2$	69.00		重铬酸钾	$K_2Cr_2O_7$	294.18	分析纯
硫酸镍	$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	280.88		硫酸	H_2SO_4	98.08	

①50.0g·l^{-1}亚硝酸钠标准溶液的配制　将亚硝酸钠固体试剂放入称量瓶（去盖）内置于烘箱中，于105±5℃下烘2h，然后取出置于干燥器中冷却至室温，在天平上称取5.0g，置于100ml烧杯中，用小半杯蒸馏水溶解后，移入100ml容量瓶中，以少量蒸馏水冲洗烧杯3次，冲洗液并入容量瓶内，然后再用蒸馏水稀释至刻度，摇匀后置于阴凉处备用。

②饱和硫酸镍的0.05mol硫酸标准溶液的配制　用量筒量取70ml的0.05mol稀硫酸倒入烧杯中，然后在天平上称取约50g硫酸镍固体试剂，用牛角勺分数次舀入烧杯，每次都要用玻璃棒搅拌均匀，要待试剂全部溶解时，再次加入试剂于烧杯中，搅匀，如此反复，直至略有结晶析出为止。最后将烧杯中的溶液倒入100ml瓶中，塞好瓶盖备用。使用前注意摇匀。

③0.05mol稀硫酸溶液的配制　用量筒量取约1000ml蒸馏水倒入1000ml磨口瓶中，用移液管吸取浓硫酸2.8ml，注入瓶中，搅拌均匀待用。

④含铬量30μg·ml^{-1}重铬酸钾溶液的配制　在分析天平上称取重铬酸钾试剂42mg，置于100ml烧杯中，用0.05mol稀硫酸溶解后，移入500ml容量瓶中，以少量的0.05mol稀硫酸冲洗烧杯3次，冲洗液并入容量瓶内，然后再用0.05mol稀硫酸稀释至刻度，摇匀，置于阴凉处备用。

（二）单光束紫外可见分光光度计的检定[1]

1. 技术要求

（1）外观与初步检查

①仪器应有下列标志：仪器名称、型号、制造厂名、出厂时间和仪器编号。

②仪器应能平稳地置于工作台上。各紧固件均应紧固良好。各调节旋钮、按键和开关均能正常工作，无松动现象。电缆线的接插件均应紧密配合，接触良好。样品架拉杆应推拉自如，无松动卡住现象、并能正确定位。各透光孔的透光量应一致。

③仪器的波长刻度盘、吸收比和透射比刻度盘、狭缝宽度刻度盘、指零仪表刻度盘的刻线、刻字和读数标线应粗细均匀清晰。刻线宽度不得超过0.1mm。

④仪器处于工作状态时，电源无漂移，光源无抖动和闪耀现象。氢灯或氘灯能正常起辉。仪器的波长度盘置于580nm处，在样品室内应能看到亮度均匀，边界清晰的光斑。光斑的亮度应随狭缝宽度的增大而增强。

⑤仪器所配吸收池的透光面应光洁，不应有划痕、斑点，任何一面不得有裂纹。石英吸收池应有标志。

（2）波长准确度与波长重复性

①仪器的波长准确度应符合表13-32的要求。

②波长重复性应不大于相应波长准确度绝对值的1/2。

（3）分辨率　仪器应能分辨汞365.02，365.48，366.33nm三条谱线。

（4）示值灵敏度和光度灵敏度

[1] 详见JJG 375—85。

表 13-32 单光束紫外-可见分光光度计的波长准确度

λ/nm	准确度 λ/nm		λ/nm	准确度 λ/nm		λ/nm	准确度 λ/nm	
	棱镜	光栅		棱镜	光栅		棱镜	光栅
200	±0.2	±0.5	404.66	±0.7	±0.5	546.07	±1.3	±0.5
253.65	±0.3		435.83	±0.9		579.07	±1.4	
296.73	±0.7		486.13	±1.0		600	±1.5	
300	±0.4		(486.00)	±1.0		690.72	±2.7	
313.15	±0.5		500	±1.1		800	±4.0	
365.02	±0.6		528.7	±1.2		808	±4.0	
400	±0.7							

①仪器的透射比改变1%时，指零仪表指针的偏转应大于2mm。数字显示仪器不作要求。

②在相应波长下仪器的狭缝宽度应不大于表13-33的规定。

表 13-33 单光束紫外-可见分光光度计的狭缝宽度

λ/nm		200	625	800
狭缝宽度(mm)	蓝敏光电管	0.5	0.1	
	红敏光电管		0.06	0.1

(5) 稳定度

①暗电流在三分钟内漂移所引起的透射比示值变化应小于0.2%。

②光电流在三分钟内漂移所引起的透射比示值变化应小于0.5%。

注：数字显示仪器在探测器工作的情况下，允许末位数字有±1的变动。

③电源电压220V变化±10%时，所引起的透射比示值变化应不超过±0.5%。

(6) 换挡偏差 仪器选择开关(或按键)换挡所引起的透射比示值偏差应不超过±0.2%。

(7) 透射比正确度与透射比重复性 仪器的透射比正确度和透射比重复性不超过表13-34的规定。

表 13-34 单光束紫外-可见分光光度计透射比正确度与透射比重复性

仪器情况	新制造的		使用中和修理后的
正确度/%	紫外光区	±0.6	±0.7
	可见光区	±0.5	
重复性/%	0.2		0.3

表 13-35 单光束紫外-可见分光光度计吸收池的配套性

吸收池材料	λ/nm	配套性 (%)
石英	220，350	0.5
玻璃	400，600	0.5

(8) 杂散光 新制造仪器的杂散光不大于0.6%；使用中和修理后的仪器杂散光不大于0.8%。

(9) 吸收池的配套性

①吸收池的配套性应符合表13-35规定。

②吸收池的内部几何长度与标称值之差应不超过±0.1mm。

2. 检定环境条件

仪器应放置在不受强光直射的地方；室内不受气流影响，且没有强电磁场干扰；仪器电源必须接地良好；室温在(20±5)℃范围内，相对稳定；相对湿度小于85%。

3. 检定方法

(1) 外观与初步检查按1.(1)要求进行。开机预热30分钟后进行以下各项检定。

(2) 波长准确度与波长重复性❶❷

❶ 对于不带汞灯或无法安装笔形汞灯的仪器允许使用氧化钬玻璃或氧化钬的高氯酸溶液的吸收峰作参考波长。

❷ 允许在表13-29所列的汞谱线中任选5条均匀分布的谱线作参考波长。

①用石英汞灯的光谱线作参考波长，缝宽一般为0.02mm，从短波向长波方向对汞谱线进行测量。然后，氢灯用486.13nm谱线（氘灯用486.00nm谱线）、钨灯用镨钕滤光片的528.7nm和808nm吸收峰作参考波长，再次测量波长准确度。

上述测量连续3次，各波长测量值均须符合表13-32的要求。

②按下式计算波长正确度

$$\Delta_\lambda=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i-\lambda_r \tag{13-7}$$

式中，λ_i为波长测量值；λ_r为参考波长的数值；n为测量次数。

按下式计算波长重复性：

$$\delta_\lambda=\max\left|\lambda_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right| \tag{13-8}$$

按下式计算波长准确度：

$$u_\lambda=\Delta_\lambda\pm\delta_\lambda \tag{13-9}$$

（3）分辨率　仪器的狭缝宽度用0.02mm，对波长为365.02，365.48，366.33nm的汞三线进行测量，应能观测到相应的波长峰值。

（4）示值灵敏度和光度灵敏度

①仪器的灵敏度旋钮按使用说明书要求旋至适当位置；波长置于500nm处；选择开关置于“×1”挡，透射比度盘置于100%刻线处。调节狭缝宽度使指零仪表指0。当透射比改变±1.0%时，观测指零仪表指针向左右偏转的程度。

数字显示仪器不进行这项检定。

②仪器灵敏度旋钮的位置与1款相同；选择开关置于“校正”挡；波长置于200nm处用氢灯（或氘灯），625nm处用钨灯和蓝敏光电管；调暗电流零后打开光门调节狭缝宽度，使指零仪表指0，读取相应的狭缝宽度。然后，波长置于625nm和800nm处用钨灯和红敏光电管，重复上述测量。

数字显示仪器，用透射比测量挡，测量条件同上。调节暗电流零后打开光门，调节狭缝宽度，使透射比为100.0，读取相应的狭缝宽度。

（5）稳定度

①仪器选择开关置于“×1”挡；灵敏度旋钮按使用说明书要求旋至适当位置；透射比度盘旋至0%刻线处；关闭狭缝（若狭缝漏光，可用黑纸遮挡），打开光门，用蓝敏光电管，调暗电流旋钮使指零仪表指0。观测3min，将指针漂移转换为透射比示值变化。然后，用红敏光电管重复上述测量。

②仪器的灵敏度旋钮按使用说明书要求旋至适当位置；选择开关置于“×1”挡；将透射比度盘旋至100%刻线处；波长置于200nm处，用氢灯（或氘灯）和蓝敏光电管，打开光门，调节狭缝宽度使指零仪表指0。观测3min，将指针的漂移转换为透射比示值的变化。然后，在625nm处用钨灯，重复上述测量。

测量条件同上。波长分别置于625nm和800nm处，用钨灯和红敏光电管，测量光电流漂移。

数字显示仪器，测量条件同上。用透射比测量挡，调节狭缝宽度使透射比示值为100.0，在3min内读取透射比示值的最大变化。

③波长置于200nm处，用氢灯（或氘灯）和蓝敏光电管，选择开关置于“×1”挡（或透射比

测量挡)；调节透射比示值为100%(或100.0)。用调压变压器改变输入电压220V±10%，观测电压变化引起的透射比示值变化。然后，在625nm处用钨灯和红敏光电管，重复上述测量。

(6) 换挡偏差

①仪器的波长置于200nm处；用氢灯（或氘灯）和蓝敏光电管；选择开关置于"校正"挡。经暗电流调零和透射比100%校正后，将选择开关从校正挡转至"×1"挡；调透射比度盘，使指零仪表指0。读取透射比示值与100%线之差。

然后，关闭狭缝，调节透射比度盘，使指零仪表指0，读取透射比示值与0%线之差。

数字显示仪器不进行这项检定。

②波长置于200nm处；用氢灯（或氘灯）和蓝敏光电管；选择开关置于"×1"挡；透射比度盘调至10%刻线处；调节狭缝宽度和灵敏度旋钮，使指零仪表指0后，将选择开关转至"×0.1"挡，调透射比度盘，使指零仪表指0，读取透射比示值与100%线之差乘以0.1。

数字显示仪器不进行这项检定。

③数字显示仪器，波长置于200nm处；用氢灯（或氘灯）和蓝敏光电管，经透射比100.0和吸收比0.000校正、透射比为10.0和吸收比1.000校正后，调节狭缝宽度和光电流旋钮，使吸收比示值为0.3010，按下透射比测量开关，读取透射比示值与50.0之差。

(7) 透射比正确度与透射比重复性

①用质量分数为$\frac{0.06000}{1000}$$K_2Cr_2O_7$的0.001mol·$L^{-1}$ $HClO_4$标准溶液，1cm工作标准石英吸收池，以0.001mol·L^{-1} $HClO_4$为参比，分别在235，257，313，350nm波长处测量其透射比，连续3次。按下式计算透射比的正确度：

$$\Delta T=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}T_i-T_{标准值} \qquad (13\text{-}10)$$

式中 T_i——透射比测量值；

$T_{标准值}$——标准溶液在相应波长下的透射比。

②按下式计算透射比重复性：

$$\delta_T=\max\left|T_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}T_i\right| \qquad (13\text{-}11)$$

③用光谱中性玻璃滤光片，以空气为参比，在可见光区检定仪器的透射比误差，分别按式(13-10)和(13-11)计算其正确度与重复性。

(8) 杂散光

①用浓度为10g·L^{-1}的NaI水溶液，1cm石英吸收池，蒸馏水作参比，在缝全高的条件下，于220nm波长处测量溶液的透射比。

②用浓度为50g·L^{-1}的$NaNO_2$水溶液，1cm石英吸收池，蒸馏水作参比，在缝全高条件下，于380nm波长处测量溶液的透射比。

(9) 吸收池的配套性和内部几何长度

①用经检定合格的紫外可见分光光度计进行吸收池配套性的检定。

②石英吸收池装蒸馏水，在220nm处，装$K_2Cr_2O_7$的0.001mol·L^{-1} $HClO_4$溶液，在350nm处；玻璃吸收池装蒸馏水，在600nm处，装$K_2Cr_2O_7$的0.001mol·L^{-1} $HClO_4$溶液，在400nm处。将一个池的透射比调至100%刻线处（或透射比为100.0处）测量其他各池的透射比。凡透射比之差小于0.5%的池可以配成一套。

③新制造的吸收池，除按第(9)②款检定其配套性之外，还须在两透光面之间的不同位

置（不少于 3 个点，每个点之间的距离不小于 5mm）进行测量，按平均值计算其内部几何长度。测量方法的精度不低于±0.02mm。

检定周期为半年。经两次检定以后，对性能稳定的仪器检定周期可延长为 1 年。

4. 检定设备、标准值及溶液配制方法

(1) 汞灯　低压石英汞灯光谱线的波长数值及其近似强度列在表 13-36 中。高压汞灯光谱线的波长数值列在表 13-37 中。

表 13-36　低压石英汞灯光谱线的波长数值及其近似强度[①]

λ/nm	强　度	λ/nm	强　度
253.65	130	365.02	25
265.20	0.5	365.48	10
275.28	0.5	366.33	5
280.44	0.5	404.66	45
289.34	0.5	407.78	5
296.73	10	435.83	85
302.15	1	546.07	50
312.57	10	576.96	15
313.15	15	579.07	10
313.18	1	690.72	0.5
334.15	2		

① 谱线强度与光源和探测器等因素有关。表中的“强度”只供选择谱线时参考。

表 13-37　高压汞灯光谱线的波长[①]

λ/nm
1014.0
1128.7
1357.0
1367.3
1395.0
1529.5
1692.1
1707.3
1711.0
1970.1
2325.3

① 石英壳或有石英窗的高压汞灯包含表 13-36 和表 13-37 的全部谱线。表 13-37 中只列出了灵敏线的波长。

(2) 氧化钬玻璃和 1.4mol·L^{-1} $HClO_4$ 的 4%氧化钬溶液的吸收峰波长数值列在表 13-38 中。

表 13-38　氧化钬玻璃和氧化钬溶液的吸收峰波长（λ/nm）

物　质	吸收峰、λ/nm			
氧化钬玻璃	279.4	360.9	453.2	536.2
	287.5	385.9	460.0	637.5
	333.7	418.9	484.5	
氧化钬的高氯酸溶液[①]	241.1	333.4	416.3	485.8
	249.7	345.5	450.8	536.4
	278.7	361.5	452.3	641.1
	287.1	385.4	467.6	

① 氧化钬的 $HClO_4$ 溶液用 1cm 石英吸收池，并以 1.4mol·L^{-1} $HClO_4$ 溶液作参比。

(3) 质量分数为 $\frac{0.06000}{1000}$ $K_2Cr_2O_7$ 的 0.001mol·L^{-1} $HClO_4$ 标准溶液在相应波长下不同温度时的透射比见表 13-39。

表 13-39　质量分数为 0.06000/1000$K_2Cr_2O_7$ 溶液不同温度时的透射比

θ/℃	235nm	257nm	313nm	350nm
10	18.0	13.5	51.2	22.6
15	18.0	13.6	51.3	22.7
20	18.1	13.7	51.3	22.8
25	18.2	13.7	51.3	22.9
30	18.3	13.8	51.4	22.9

(4) 可见光区光谱中性玻璃滤光片　其透射比误差小于 0.1%。

(5) 测定杂散光溶液的配制方法　NaI，$NaNO_2$ 均为分析纯，称取于 (105±5)℃温度下烘 2h 后置干燥器中冷却至室温的试剂。NaI 称取 5.00g，用蒸馏水溶解，移入 500ml 容量瓶

中，用蒸馏水稀释至刻度，摇匀后移入棕色磨口瓶中保存备用。用同样方法称取 25.00g $NaNO_2$，配制成 $NaNO_2$ 水溶液。

参 考 文 献

1 黄君礼．鲍治宇编著．紫外吸收光谱法及其应用，北京：中国科学技术出版社．1992
2 黄 量，于德泉编著．紫外光谱在有机化学中的应用（下册）．北京：科学出版社，1988
3 周名成．俞汝勤编．紫外与可见分光光度分析法．北京：化学工业出版社．1986
4 陈国珍，黄贤智等编著．紫外-可见分光光度法．北京：原子能出版社，1983
5 罗庆尧、邓延倬等编著．分光光度分析．北京：科学出版社，1992
6 中国科学院上海药物研究所植物化学研究室编译．黄酮体化合物鉴定手册．北京：科学出版社．1981

第十四章　吸光光度分析方法

可见-紫外吸光光度法由于所用仪器简单、操作方便、准确度高，因此在无机和有机定量分析中得到广泛的应用。但对经典吸光光度法来说，当试样溶液混浊、有较大的背景吸收、或测定体系为相互干扰的多组分混合物等情况存在时，往往会产生较大的测定误差，甚至许多问题根本无法解决。为了解决这些问题，从五十年代开始，提出并发展了许多新的吸光光度分析方法，这些新的方法大大充实了可见-紫外吸光光度法的内容。近代可见-紫外定量分析方法大致可分为两类。一类是采用将共存组分中的干扰组分设法加以消除后，再对某一组分进行定量测定，如双波长法、三波长法和正交函数法等均属于这一类。另一类是通过对测定数据进行数学处理后，同时得出所有共存组分各自含量，这类方法可称为计量学吸光光度法。随着电子计算机科学、应用数学以及统计学方法在化学，尤其是在分析化学中应用的不断广泛和深入，一门崭新的化学分支学科——化学计量学 (Chemometrics) 诞生了。将化学计量学中的许多校正方法用于吸光光度法就构成了计量学吸光光度法、其中包括多波长线性回归、改进矩阵法、因子分析法、主成分回归、偏最小二乘法、岭回归、线性规划法和人工神经网络等。导数吸光光度法兼有这两类方法的特征。这些近代定量分析方法可不经分离就能解决一些复杂混合物中各组分含量的测定。作为有效地提高吸光光度法的精密度和准确度的差示吸光光度法近年来又有新的改进和发展，在高含量组分分析方面得到广泛的应用。以测量反应物浓度和反应速率之间的定量关系为基础的动力学吸光光度法，以其选择性好和灵敏度高及可利用的化学反应范围广等优点在70年代后得到了加速的发展。此外和流动注射技术相结合的流动注射吸光光度法；和浮选技术相结合的浮选吸光光度；直接在固相上测量吸光度的固相吸光光度法；激光在光度法中的应用和光声光谱分析法等更丰富了吸光光度分析方法的内容。本节将对以上各种方法作扼要介绍，并给出近十多年来国内发表的应用文献供参考。

第一节　吸光光度法的准确度和一般定量方法

一、吸光光度法的准确度

影响吸光光度法准确度的因素可概述如下[1]：

1. 仪器的因素

因仪器使吸光度测量产生误差的原因有光的非单色性、杂散光的影响、波长标尺和吸光度标尺未作严格的校正、入射光的不平行性和狭缝宽度的影响等。

2. 实验技术不适当引起的误差

这种误差包括由于使用了不适当的溶剂，使用了不匹配或透光面不平行的吸收池和在测定过程中温度发生了变化等，从而导致吸光度测量的误差。所选择的溶剂不应与待测物发生化学反应，溶剂本身在待测波长处应无吸收，溶剂中不应含有影响测量的杂质。表 14-1 列出了常用溶剂可允许测定的最小波长。吸收池应预先做配对试验，使用时要注意其对光方向，使用后要及时洗涤，表 14-2 列出的洗涤方法可供参考。

3. 由于化学反应和吸收物的圆二向色性而引起对比耳定律的偏离

溶液中的吸光物质常因离解、缔合、形成新化合物或互变异构体等化学变化而改变其浓度，导致偏离比耳定律。圆二向色性物质对光的吸收不仅与波长有关，而且与入射光的偏振态有关，当采用非偏振入射光时，圆二向色性物质就偏离比耳定律。

4. 辐射和物质的非吸收作用的影响

样品溶液和参比溶液的折射率不同时，其引起的反射损失是不同的；待测溶液混浊时，就会产生散射；有些物质受紫外-可见光照后可能引起化学变化或产生荧光。以上非吸收作用都会引起吸光度的测量误差。

表 14-1 紫外光区常用溶剂可允许测定的最小波长

溶剂	λ(紫端极限)/nm	沸点/℃	溶剂	λ(紫端极限)/nm	沸点/℃
水	187	100.0	硝基甲烷	380	101.2
	200		1，1，2-三氯三氟乙烷	231	47.6
乙酸	270	118	二硫化碳	375	46.5
H_2SO_4(98%)	210	338	苯	280	80.1
甲醇	220	64.7	甲苯	285	110.8
乙醇(95%)	204	78.1	二甲苯	290	144
2-丙醇	205	82.4	二甲基亚砜	265	189
异丙醇	210	82.5	四氢呋喃	235	66
正丁醇	210	117.7	1，4-二氧杂环己烷（1，4-二噁烷）	230	101.1
2,2,2-三氯乙醇	190	79			
二氯甲烷	235	41.6	乙醚	215	84.6
1,2二氯乙烷	235	83.5	丁醚	210	112
氯仿	245	62	双（2-甲氧基乙基）醚	220	162
四氯化碳	262	76.9	丙酮	230	56
戊烷	190	79	甲酸甲酯	260	57
己烷	195	68.8	乙酸乙酯	255	77.1
庚烷	197	98.4	乙酸戊酯	235	148
2-甲基丁烷	192	28	吡啶	305	116
异辛烷（2,2,4-三甲基戊烷）	210	99.2	N，N-二甲基甲酰胺	270	153
			甘油	230	290
环己烷	210	80.8	乙腈	210	81.6
环戊烷	198	49.3	四氯乙烯	290	121.2

表 14-2 吸收池洗涤方法

名称	洗涤液	用法
JIS（日本工业标准）	1. Na_2CO_3（20g/L）+少量阴离子表面活性剂； 2. 稀 HNO_3（1∶5）+少许 H_2O_2。	浸泡于（1）后水洗，再浸于（2）后水冲洗
ASTM（美国材料试验标准）	φ盐酸∶φH_2O∶φ甲醇=1∶3∶4	浸泡后水洗

吸光光度分析的准确度和精密度受仪器噪声的限制，各种噪声源中相对浓度误差与透射比或吸光度的关系见表 14-3。

表 14-3 各种噪声源中相对浓度误差与透射比或吸光度的关系

透射比 (τ)	吸光度 (A)	相对误差 $\left(\frac{s_c}{c}\right)$/%			透射比 (τ)	吸光度 (A)	相对误差 $\left(\frac{s_c}{c}\right)$/%		
		τ=0%或约翰逊噪声	信号散粒噪声	闪变噪声			τ=0%或约翰逊噪声	信号散粒噪声	闪变噪声
0.95	0.022	±6.2	±8.4	±5.8	0.10	1.00	±1.3	±0.43	±0.13
0.90	0.046	±3.2	±4.1	±2.8	0.032	1.50	±2.7	±0.50	±0.09
0.80	0.097	±1.7	±2.0	±1.3	0.010	2.00	±6.5	±0.65	±0.06
0.60	0.222	±0.98	±0.96	±0.59	0.0032	2.50	±16.3	±0.92	±0.05
0.40	0.398	±0.82	±0.61	±0.33	0.0010	3.00	±43.4	±1.4	±0.04
0.20	0.699	±0.93	±0.46	±0.18					

τ=0%噪声与光电转换器和放大器有关，约翰逊噪声来源于电子在电路元件中的热运动，

表中数值取 $S_\tau=\pm0.003$ 时由 $\frac{s_c}{c}=\frac{0.434}{\lg\tau}\times\frac{S_\tau}{\tau}$，求得式中 S_τ 为一系列重复测量噪声的标准偏差。信号散粒噪声是由光电转换器件的阴极和阳极接合处电子流不规则波动引起的，取 $K_2=\pm0.003$，由 $\frac{s_c}{c}=\frac{0.434K_2}{\lg\tau}\sqrt{\frac{1}{\tau}+1}$ 求得表中数值，式中 K_2 为比例常数。光源闪变噪声主要来自光源，表中数值为取 $K_3=\pm0.003$ 时，由 $\frac{s_c}{c}=\frac{0.434K_3}{\lg\tau}$ 求得。式中 K_3 为该噪声引起透光透偏差与透光率的比例常数。

二、紫外-可见吸光光度法的一般定量方法[2]

（一）绝对法

若吸收池光路长度 b 和待测化合物的摩尔吸收系数 ε 为已知，在测定样品溶液的吸光度 A 后，由下式求出待测物质的浓度 c_x，即

$$c_x=\frac{A}{\varepsilon\cdot b} \tag{14-1}$$

待测物质的摩尔吸收系数 ε 可从有关手册或文献中查找，这种方法称为绝对法。

（二）标准对照法（直接比较法）

在同样的条件下，分别测定标准溶液（浓度为 c_s）和样品溶液（浓度为 c_x）的吸光度 A_s 和 A_x，由下式求出待测物质的浓度。

$$c_x=\frac{A_x}{A_s}\cdot c_s \tag{14-2}$$

（三）比吸收系数法

在药物分析中，常采用比吸收系数法。比吸收系数 $E_{1cm}^{1\%}$ 定义为：当浓度为 1%，吸收池光路长度为 1cm 时的吸光度，并由下列方程表示：

$$E_{1cm}^{1\%}=\frac{10\cdot\varepsilon}{M_r} \tag{14-3}$$

式中　M_r——被测物质相对分子质量。

被测样品的含量（$w/\%$）可由下式计算

$$w/\%=\frac{E_{1cm(样)}^{1\%}}{E_{1cm(标)}^{1\%}}\times100\% \tag{14-4}$$

（四）加入法

这种方法是先测量浓度为 c_x 的待测液的吸光度 A_x，然后在此待测液中加入一浓度为 c_Δ 的标准溶液，再测量其吸光度 $A_{x+\Delta}$，由下式可计算待测溶液的浓度 c_x。

$$c_x=\frac{A_x}{A_{x+\Delta}-A_x}\cdot c_\Delta \tag{14-5}$$

亦可采用直线外推作图法求出待测溶液浓度 c_x，见图 14-1。图中，横坐标为浓度 c，纵坐标为吸光度 A。将 D、E 两点连线并延长，在横坐标轴上的截距 AB 即对应于待测液浓度 c_x。

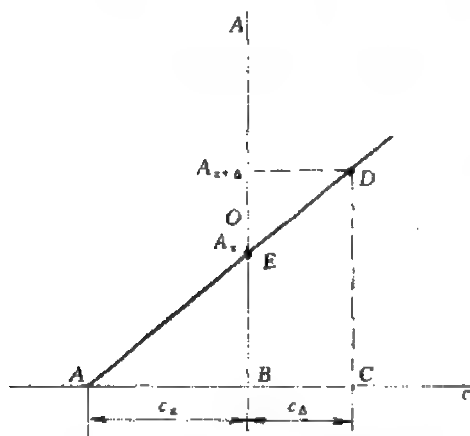


图 14-1　加入法的直线外推作图法

（五）标准曲线法（工作曲线法）

先配制一系列浓度不同的标准溶液，在与试样相同条件下，分别测量其吸光度。将吸光度与对应浓度作图，所得直线称标准曲线或工作曲线；然后测定试样的吸光度，再从标准曲线上查出试样溶液的浓度。

标准曲线可用一条直线来描述吸光度与浓度 c 之间的关系。即 $\hat{c}=aA+b$ 此式称一元线性回归方程，可根据最小二乘法的原则建立。其中 a 为回归系数，b 为截距，a、b 分别由以下公式计算。

$$a=\frac{S_{(cA)}}{S_{(AA)}} \tag{14-6}$$

$$b=\bar{c}-a\bar{A} \tag{14-7}$$

式中 $\bar{A}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}A_i$；$\bar{c}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}c_i$；$S_{(AA)}=\sum_{i=1}^{n}(A_i-\bar{A})$；$S_{(cA)}=\sum_{i=1}^{n}(A_i-\bar{A})(c_i-\bar{c})$

c 与 A 之间线性关系的密切程度用相关系数 r 来度量：

$$r=\frac{S_{(cA)}}{\sqrt{S_{(cc)}S_{(AA)}}} \quad (0\leqslant|r|\leqslant1) \tag{14-8}$$

式中 $S_{(cc)}=\sum_{i=1}^{n}(c_i-\bar{c})^2$。

（六）解联立方程法

在同一试样中同时测定二个以上的待测组分时，可以采用解联立方程法，如果在样品中有 n 个组分，其浓度分别为 c_1、c_2、……、c_n。选择 n 个波长位置作为测量波长，根据吸光度的加和性得到如下联立方程组。

$$\begin{cases}A_1=\varepsilon_{11}c_1+\varepsilon_{12}c_2+\cdots+\varepsilon_{1n}c_n\\A_2=\varepsilon_{21}c_1+\varepsilon_{22}c_2+\cdots+\varepsilon_{2n}c_n\\A_n=\varepsilon_{n1}c_1+\varepsilon_{n2}c_2+\cdots+\varepsilon_{nn}c_n\end{cases} \tag{14-9}$$

也就是

$$A_i=\sum_{j=1}^{n}\varepsilon_{ij}c_j \qquad (i=1,2\cdots\cdots,n)$$

式中 A_i——第 i 个波长处 n 个组分的总吸光度；

ε_{ij}——第 j 个组分在第 i 个波长位置处的摩尔吸收系数；

c_j——第 j 个组分浓度。

可以根据克莱姆法则通过行列式运算求得方程组解 c_1，c_2，…，c_n，也可以用矩阵法求解。

第二节　差示吸光光度法

一、差示吸光光度法概述

差示吸光光度法是利用接近样品试液浓度（稍低或稍高）的参比溶液来调节分光光度计的 0%τ' 和 100%τ' 以进行光度测量的方法。Kortüm 和 Von Halban[3]首先提出测量相对透光率以降低光电吸光光度测量误差的可能性。随后，Kortüm[4]讨论了测量相对透光率的有关问题，1939 年，Ringbon 及其同事[5,6]阐述了测量相对透光率的差示吸光光度法的优点。1949 年，Hiskey[7]对此法的原理进行了论证，奠定了其理论基础。1955 年 Reiley[8]，1966 年 Srehla[9]等又作了补充和综述。近年来，这一方法又有改进和发展。管宗颉[10~13]发表了一系列的文章，对

该法的基本原理、测量误差和实际应用中的问题作了进一步的阐述。杜治坤[14]等提出全差示吸光光度法。顾靖飞[22]提出双标准最精密差示测定方法。有关这一方法的还有其他一些文献[15～19，23，24]。

（一）差示吸光光度法原理

在差示吸光光度法中用一已知浓度的标准溶液作参比溶液，测量样品的相对吸光度 $A_{相对}$，$A_{相对}$由下列方程式表示：

$$A_{相对}=\varepsilon \cdot b \cdot (c_s-c_x) \quad (14\text{-}10)$$

式中，c_s 为标准溶液浓度；c_x 为未知溶液浓度。

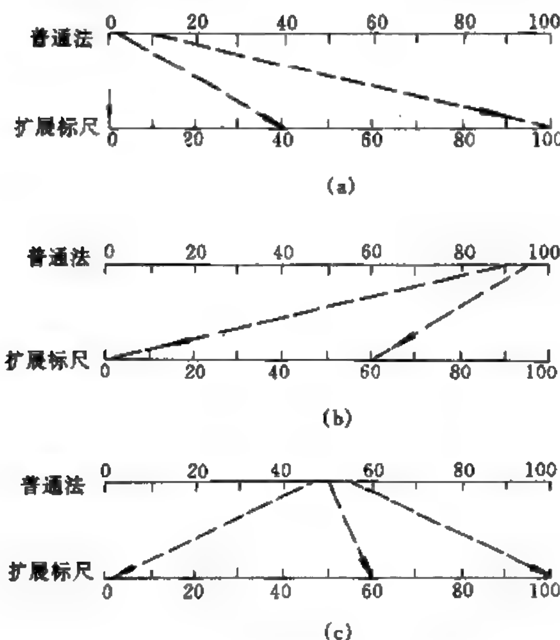


图 14-2　差示测量法标尺扩展示意图
(a) 高吸光度差示法；(b) 低吸光度差示法；
(c) 最高精密差示法

上式表明 $A_{相对}$ 值的大小与标准溶液和未知溶液浓度差成正比，在用差示法定量时可用单一组分测定的各种方法，但以标准加入法和标准曲线法应用较多。

差示法中，按照使用参比溶液份数，及参比溶液浓度高于或低于待测溶液，又可分为 4 种操作方法：

1. 高吸光度法

使用一个浓度稍低于待测溶液的参比溶液，先在分光光度计检测器未受光照时，调节透射比为 0%，然后用参比溶液调节透射比为 100%，此时待测溶液所测得的透射比即落入误差符合要求范围之内，见图 14-2(a)。

2. 低吸光度法

使用两种参比溶液，以空白溶液（蒸馏水、纯溶剂或试剂空白）调节透射比 100%，以浓度稍高于待测溶液的参比溶液调节透光率为 0%，所以待测溶液的透射比落入误差符合要求范围，见图 14-2 (b)。

3. 最高精密度法

以一个浓度较待测溶液稍低的参比溶液调节透射比为 100%，以另一个浓度稍高的调节透射比为 0%。如果两个参比溶液浓度选择合适而且两者浓度差值愈小，则待测溶液的吸光度值可以控制在 $A=0.4343$ 左右，此时浓度测量的相对标准偏差最小，故称为最高精密度法，见图 14-2 (c)。

4. 全差示光度测量法

所谓全差示法，即规定以某一特定值的反向微电流 i 向左（透射率比为 0%一端）扩展一恒定值，再用一参比标准溶液 c_s 调节透射比为 100%，结果同样可以达到在标尺左右两个方向上放大标尺的目的，收到最高精密度法的效果，同时又克服了最高精密度法的缺点。根据全差示的原理而设计的 7215 型和 82 型全差示光度计的灵敏度、准确度和线性精度都有显著提高，可用于高、中、低、微量组分的差示光度分析。

全差示光度法是或多或少带有一些中国特色的差示光度法的变体，顾靖飞[18]曾对全差示

光度法的参数：调百参比 τ_{r}'，反向微电位 i，标尺放大倍数 X 的定义和性质作了阐述，并导出调零参比 τ_{R}'，论述了各参数间相互关系及其应用。管宗颛提出全差示光度法中的双向测定标准加入法，以改进测量的可靠性。陈芳泉[21]等对全差示光度法的原理进行了重新研究，认为它有局限性。

（二）差示吸光光度法的实验技术条件

（1）对仪器的要求　仪器必须具有在光束通过一定吸收物质时调节满刻度的能力，因此必须装配强的光源，色散性能好的单色器和足够稳定的电子学系统。

（2）对吸收池要求　吸收池严格进行选择配对，必要时进行校正。

（3）温度控制　Hiskey[7]指出，采用差示法制作校正曲线和测量样品时，温度必须控制在±2℃范围内。Bastian[20]仔细研究了不同体系的温度效应。要获得高精度差示光度测量，必须有一个很好的恒温装置，要能控制温度在±0.2℃范围内。

二、差示吸光光度法应用

表 14-4 和表 14-5 给出了在国内发表的部分差示吸光光度法在无机和药物分析方面的应用文献，另外也包括了少量国外文献。

表 14-4　差示吸光光度法在无机分析中的应用

被测元素	测定对象	显色体系	λ_{max}/nm	测定范围	文献
Al		铬天青 B-CPB	—		1
	铝青铜	二甲酚橙	560	(300～500)μg/200ml(300μg/200ml Al 作参比)	2
		二甲酚橙	540	(100μg/100ml Al 作参比)	3
	钛和钛合金	铝试剂	540	(0.5～1.5)μg·ml^{-1}(0.5μg·ml^{-1} Al 作参比)	4
Au	湿法冶金中间产品	孔雀绿	430	(100～180)μg(80μgAu 作参比) (160～220)μg(140μgAu 作参比)	5
	地质样品	金试剂(4,4'-双(二乙氨基)二苯基甲硫酮)-tritonX-100(全差示光度法)	—		6,7,8
Be		对硝基苯偶氮间苯二酚		(0.011～0.016)mg·ml^{-1}(0.011mg·ml^{-1} Be 作参比)	9 10
Ca	磷化溶液	间氯偶氮安替比林			11
Co	高温合金	亚硝基红盐	520	(0.20～0.40)mg(0.20mg/25ml Co 作参比) (0.40～0.60)mg(0.30mg/25ml Co 作参比)	12
	13合金钢	过氯酸介质中	—	(12～30)mg·ml^{-1}(12mg·ml^{-1} Co 作参比)	
	过氯酸钴		—		14
	矿石	亚硝基 R 盐	—		15
	岩石，土壤	5-Cl-PADAB(全差示光度法)	—		16
		EDTA(全差示光度法)	510		17
Cr		高氯酸铬(Ⅲ)	410 或 580	0.95mg·ml^{-1}Cr 和 2.21mg·ml^{-1}Cr 参比作调 100%τ' 和 0%τ'	14
		重铬酸盐	350	(0.049～0.061)mg·ml^{-1}Cr(0.049mg·ml^{-1}Cr作参比)	18
		重铬酸盐	350		19
	合金	高氯酸介质	350		20
	污水	二苯碳酰二肼	—	最佳范围可达 146mg·L^{-1}	21
	电镀废水	二苯碳酰二肼	—	以 10μg/50ml Cr^{6+} 作参比	22
	钢铁			(0.1～10.5)mg·ml^{-1}	23
	铝合金	二苯氨基脲	540	(200～400)μg/100ml	24
Cu	岩石，土壤	铜试剂(DDTC)	—		16
	铜阳极泥，冰铜铜精矿，氧化铜	EDTA	735	100mg/100ml 以内	25

表 14-4 参考文献：

1 应文河，杜 玲. 冶金分析. 1984，4(5)：11
2 廖文序，杜廷珍. 理化检验（化）. 1983，19(5)：36
3 吕沙白. 分析化学. 1985，13(8)：638
4 D. K. Banergee. Anal. Chem. 1957，29：55
5 刘 旭，周伯劲. 贵金属. 1983，4(1)：35
6 薛 光. 分析化学 1988，16(1)：64
7 杜炜梁，林芸青等. 地质实验室. 1988，4(6)：366
8 薛 光. 冶金分析. 1989，9(1)：58
9 J. C. White，A. S. Meyers et al.，Anal. Chem. 1956，28：956
10 马冲先，吴 诚. 分析试验室，1991，9(2)：18
11 毛敏修，潘教麦. 理化检验（化）. 1988，24 (1)：21
12 胡守坤，景保林. 四川大学学报（自然科学版），1985，(2)：101
13 A. Pall，G. Svehlo et al.. Talanta. 1964，11：1383
14 S. D. Ross，D. W. Wilson. Analyst. 1960，85：51
15 B. D Guerin. Analyst，1956，81：409
16 刘国钧，岩矿测试. 1986，51(1)：71
17 尹兴仁，杜治坤. 湖南有色金属. 1994，10(5)：309
18 R. Bastian，R. Webering et al. Anal. Chem. 1950，22：160
19 C. F. Hiskey，D. Firestone. Anal Chem. 1952，24：342
20 広川. 日本金属学会誌 1959，23：371
21 汤福娟. 重庆环境保护. 1984，6(5)：48
22 王泾阳. 环境科技. 1988，8(6)：74
23 庄明福，蒋凤华. 理化检验（化）1993，29 (3)：178
24 李民青. 冶金分析. 1994，14(4)：47.
25 王正模. 冶金分析. 1987，7(4)：69

表 14-5 差示吸光光度法在药物分析中的应用

待测物质	测定对象	λ/nm	线性范围/(μg·ml⁻¹)	文献
安替比林	安替比林合剂	280	5～20	1
安定	谷维安片	368	20～60	2
氨基比林	小儿克感敏冲剂	281	7～35	3
非那西丁		254	4～20	
阿斯匹林	复方扑热息痛片	299	11～40	4
扑热息痛		267	6～22	
安替比林	复方扑热息痛注射液	230	6～28	5
扑热息痛		295	5～20	
安定	安定注射液	368	6～26	6
苯酚	苯酚制剂	288	5～40	7
保泰松	保泰松片剂	265.5	6～14	8
苯巴比妥	复方颠茄片	240	—	9
丹皮酚	—	352，387	(0.08～0.16)mg/ml	10
甲硝唑	妇洁灵气雾剂	320	3.65～21.75	11
肌苷	肌苷注射液	261	10～40	12
甲氧苄啶	复方庆大霉素	293	—	13
甲氧苄氨嘧啶	复方头孢氨苄胶囊	293	9～27	14
甲氧苄啶	复方新诺明片	293	—	15
甲硝唑	复方甲硝唑	320	5～20	16
氯霉素		278		
甲氯噻嗪	降压乐片	242	5～25	17
甲氧苄啶		294	5～25	18
盐酸黄连素		421	10～50	18
甲硝唑	甲硝唑葡萄糖注射液	277	5～25	19
抗坏血酸		265	2～20	20
磺胺乙酰钠	磺胺醋酰钠滴眼剂	257/223	—	21
磺胺甲噁唑	小儿消炎散	247.5	—	22
甲氧苄啶		287，307		
磺胺甲噁唑	增效联磺胶囊	247	7.5～12	23
磺胺嘧啶		300.5	10～30	
甲氧苄啶		320	4～20	
利福平	复方利福平胶囊	473	7.29～58.32	24
异烟肼		253，334	7.569～37.85	
氯霉素	氯霉素眼药水	278	5～30	25
扑热息痛	维生素C银翘片	266	5～20	26
	速效伤风胶囊	266	5～20	27
	速效伤风胶囊	267	1.6～16	28
	扑感敏胶囊	266	5～20	29
	感冒欣片	268	3～18	30
四环素	四环素片	394	—	31
塞米松磷酸钠	塞米松磷酸钠注射液	242	0～30	32
土霉素		390	—	33
酮康唑	复方酮康唑霜	242	8～28	34
托吡卡胺	托吡卡胺滴眼液	254	5～50	35
维生素 B_1	维生素 B_1 制剂	247	10～30	36
腺苷辅酶维生素 B_{12}	—	304.5		37
盐酸异丙嗪	非那根伤风止咳糖浆	338	10～40	38
		337		39
盐酸异丙嗪	盐酸异丙嗪糖浆	337		40
盐酸去氯羟嗪	复方氯喘片	263	200～300	41
足叶乙甙	足叶乙甙注射液	289	40～120	42

本表参考文献：

1 邓比麟. 药物分析杂志. 1992，12(3)：173
2 林棠明等. 药物分析杂志. 1991，11(2)：111
3 高柳娣等. 药物分析杂志. 1989，9(4)：238
4 陈晓明等. 药物分析杂志. 1988，8(4)：239
5 晏正华等. 药物分析杂志. 1987，7(2)：120
6 晏正华. 药物分析杂志. 1987，7(5)：311
7 王岳祥等. 药物分析杂志. 1992，12(4)：239
8 杨琪云等. 药物分析杂志. 1990，10(3)：163
9 陈荣楼等. 医药工业. 1994，25(4)：176
10 何再安等. 医药工业. 1996，27(2)：79
11 朱秀奎等. 药物分析杂志. 1993，13(3)：201
12 陈 炜. 药物分析杂志. 1993，13(1)：42
13 冯建新等. 药物分析杂志. 1992，12(1)：46
14 孟令姝等. 药物分析杂志. 1992，12(4)：231

15 刘广泉. 药物分析杂志. 1992, 12(5): 306
16 李 京. 药物分析杂志. 1989, 9(4): 241
17 张林英. 药物分析杂志. 1988, 8(1): 50
18 姜建国等. 医药工业. 1994, 25(4): 174
19 徐曙东. 医药工业. 1994, 25(4): 178
20 方洪杜等. 医药工业. 1993, 24(1): 30
21 袁继民. 医药工业. 1987, 18(1): 497
22 姚桂缘等. 药物分析杂志. 1985, 5(3): 153
23 孙吉今. 药物分析杂志. 1991, 11(3): 169
24 汤乐红等. 医药工业. 1995, 26(3): 111
25 阮计章. 药学通报. 1988, 23(5): 295
26 顾 青. 药物分析杂志. 1993, 13(1): 35
27 吕晓英等. 药物分析杂志. 1994, 14(5): 50
28 阎建生. 药物分析杂志. 1987, 7(6): 369
29 刘素艳. 药物分析杂志. 1991, 11(1): 42
30 张西茹等. 医药工业. 1995, 26(3): 110
31 陈秀红等. 药物分析杂志. 1993, 13(6): 406
32 吴明宝等. 药物分析杂志. 1991, 11(5): 291
33 林黎明等. 医药工业. 1992, 23(5): 220
34 夏志祥等. 药物分析杂志. 1995, 15(3): 42
35 唐明珠等. 药物分析杂志. 1994, 14(2): 39
36 丁霖汇等. 药物分析杂志. 1987, 7(5): 308
37 朱代舜等. 医药工业. 1989, 20(5): 213
38 覃洁萍. 药物分析杂志. 1995, 15(3): 55
39 龙子江等. 药物分析杂志. 1995, 15(5): 45
40 但菊开. 药物分析杂志. 1993, 13(4): 265
41 王生华等. 药物分析杂志. 1989, 9(5): 307
42 赵爱华. 药物分析杂志. 1994, 14(5): 49

第三节 双波长吸光光度法

一、双波长吸光光度法概述

1951年，B. Chance[25]首先提出用双波长法测定生物细胞的原始悬浊液和肌肉组织等物料，后来Butter[26]研制了用滤光片的双波长分光光度计，并用于植物色素的分析。1969年Shibata[27]首先将双波长吸光光度法用于分析化学。1974年柴田正三等人[28]撰写综述文章，介绍双波长吸光光度法的原理与应用，1976年又进行了综述[29]，1979年编写了第一本专著[30]。1968年日立公司研制了商品化的通用性仪器——日立356型双波长双光自动记录分光光度计[31]。此后，双波长法在分析化学中的应用获得迅速的发展。我国70年代后期才开始重视该法的介绍[32~39]，国内已有两本专著出版[40,41]。

（一）双波长吸光光度法的原理

双波长吸光光度法是以样品溶液本身做参比，用两束强度相等的单色光 λ_1 和 λ_2 交替人射到同一样品溶液。于是，透过试样溶液的两束单色光的吸光度差值 ΔA 为

$$\Delta A = A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2} = (\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})cb \tag{14-11}$$

上式表明，试样溶液在两个波长 λ_1 和 λ_2 吸光度差值 ΔA 与溶液中待测物质的浓度成正比，这就是双波长分光光度法进行定量分析的依据。

（二）双波长的选择

在双波长法中，波长的组合和选择是方法的关键问题，通常将 λ_1 称为测量波长，将 λ_2 称为参比波长，选择双波长的方法各有不同，在有共存干扰吸收物质时，常采用等吸收点法和系数倍率法并用电子计算机选择 λ_2-λ_1 波长组合。

1. 等吸收点法

对于互有干扰的双组分体系，选择两个波长 λ_1 和 λ_2，使待测组分的 ΔA 足够大，干扰组分的 $\Delta A=0$，从而消除干扰组分影响，如 λ_2 和 λ_1 是组分 y 的等吸收点处相应的波长，则有

$$\Delta A = (\varepsilon_x - \varepsilon'_x)c_x \tag{14-12}$$

这样，测得的 ΔA 就与组分 y 的浓度无关，即 y 组分的干扰得到消除。

同理
$$\Delta A = (\varepsilon_y - \varepsilon'_y)c_y \tag{14-13}$$

即测得的吸光度差 ΔA 就与组分 x 的浓度无关，即组分 x 的干扰得到消除。

式中 ε_x 和 ε_y——组分 x 和 y 在波长 λ_1 处的摩尔吸收系数；

ε'_x 和 ε'_y——组分 x 和 y 在波长 λ_2 处的摩尔吸收系数；

c_x 和 c_y——组分 x 和 y 的摩尔浓度。

应用等吸收点法来选择波长组合 λ_1-λ_2 时可用近似法，它又分为作图法和扫描法及精密确定法。

2. 系数倍率法

等吸收点法的前提是共存组分在两个不同波长下表现相等的吸收。在找不到等吸收点的情况下，可采用系数倍率法，又称 K 系数法。该法获得差示信号与干扰组分含量无关。

$$\Delta A = A_{\lambda_1} - K_1 A_{\lambda_2} = kc \quad (14\text{-}14)$$

式中，ΔA 为吸光度差值；A_{λ_1}为样品溶液在测量波长 λ_1 处的总吸光度；A_{λ_2}为样品溶液在参比波长 λ_2 处的总吸光度；K_1 为校正系数；k 为标准曲线斜率；c 为样品溶液待测组分浓度。

校正系数 K_1 由下式求取：

$$\Delta A_{干} = A_{干\lambda_1} - K_1 A_{干\lambda_2} = 0 \quad (14\text{-}15)$$

只要测出干扰组分在 λ_1 和 λ_2 处的吸光度，便求解 K_1。

在双组分的测定中，一般应用以上两种方法来选择波长对，但对于某些吸收曲线相似且严重重叠的体系，仍然不易选择，为此可用电子计算机选择双组分体系的波长对[42]。用电子计算机选择三组分体系的波长对亦有文献报道[43]。

（三）双波长测量方法类型

按波长选择方式不同，有 3 种最基本最常用的方法，即双峰双波长法、双波长等吸收点法和双波长 K 系数法。上述 3 种方法的组合又构成两次双波长法[44]，即等吸收点法-系数倍率法及等吸收点法-双峰双波长法。如果在测量中固定参比波长，连续改变测量波长，这种测量方法叫微差光谱双波长法[45]。在同一显色体系中加入 2 种显色剂的混合显色剂双波长法[46]。波长对的组合为 2 个完全独立的显色体系的双显色双波长法[47]。按试样性质和含量不同，有混浊背景双波长法[48,49]和高含量双波长法[50]。按与其他分析方法或分离方法联用方式不同，有胶束增溶双波长法[51]、薄层色谱双波长法[52]，高效液相色谱双波长法[53]，非水滴定双波长终点指示法和双波长光度滴定[54]及毛细管双波长法[55]等等。

（四）双波长法的灵敏度

用双波长法进行单组分测定时，如果选择显色剂的最大吸收波长作参比波长 λ_2，配合物的最大吸收波长作测定波长 λ_1 时，由于化学反应消耗了显色剂而降低了显色剂的吸收叠加在配合物吸收上，使配合物的表观摩尔吸光系数增加，提高了测定的灵敏度。目前已有四种理论解释：从吸收曲线的正负考虑[56~59]；从标准曲线的斜率考虑[60]；从公式的简化考虑[61,62]，从摩尔吸光系数考虑[63]。并对双波长法提高灵敏度的规律进行了研究[59,64~66]。

（五）双波长法的准确度和精密度[35,67~76]

双波长法的误差主要来自两个方面，一是化学和物理干扰物产生的误差；二是仪器的非理想性产生的误差，包括吸收池的性质和位置、杂散光和信号失调、过大的通带以及由于多次散射或多次内反射所产生的光程不一致等。

（六）双波长吸光光度法的特点

双波长吸光光度法有如下特点：

（1）可进行浑浊试样的分析。

（2）通过适当的波长组合，可进行双组分或三组分混合物的同时测定。

（3）当 λ_1 和 λ_2 相差（1～2）nm 时，使双波长同时扫描，可组录一阶导数光谱。

（4）采用一波长固定，另一波长扫描，记录吸收光谱，可消除浑浊背景的影响。

（5）采用双笔记录器，可记录溶液中发生的两种现象。

目前许多分析工作者在用普通的单波长分光光度计开展双波长吸光光度法的应用研究时，一般采用两种方法，一是在单波长的仪器上分别测定样品在两个波长处的吸光度，然后算出吸光度差 ΔA[77~80]，另一方法是在单波长仪器上联接适当附件，直接测定吸光度差[81~83]，也有人在 751 型分光光度计上，按一定的操作程序，进行双波长测定[84]。

二、双波长吸光光度法应用

表 14-6 给出了部分双波长吸光光度法在无机分析中的应用。

表 14-7 给出了部分双波长吸光光度法在药物分析中的应用。

表 14-6　双波长吸光光度法在无机分析中的应用

待测元素	测定对象	显色体系	ε	显色条件	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围	文献
Ag	岩矿	丁基罗丹明 B	3.26×10^5		605	—555	(0~8)μg/25ml	1
	铜阳极泥	双硫腙-OP	3.31×10^4	pH4	425	475	(0.4~3)$\mu g\cdot ml^{-1}$	2
Al	矿石	铬天青 S		pH5.8	520	570	(0~4)μg/25ml	3
		铁试剂-CTMAB	—	pH=3.5~6.0	358.4	445	(0~200)μg/25ml	4
		CAS-CPB		pH=5.7~5.9		619	≈60μg/50ml	5
Al Fe	食品	铬天青 S 5-Br-PADAP	—	pH6.2	622 560	506 660	(0.2~5.0)μg/25ml (1.0~15.0)μg/25ml	6
	铬铁矿	8-羟基喹啉	—	pH=5~5.4	385 385	499.5 470	(0~40)μg/10ml	7
	海泡石	8-羟基喹啉 ECR	—	pH=5~5.4 pH5.8	530	588	—	8
	矿物	CAS-DDPFA	—	pH=6.0~8.0	610 630	640 580		9
		CAS-氯化十六烷基吡啶	—	pH5.7	632 670	697 588	(0~18)μg/50ml (0~20)μg/50ml	10
	矿石	铬天青 S-OP	—	pH6.3	684	620 733	—	11
	碳酸盐	铬天青 S-亚硝基 R 盐	—	pH5	812.7 800	620 720	—	12
As P		Mo(Ⅴ) Mo(Ⅵ)	—	$0.36mol\cdot L^{-1}$ $HClO_4$	766 873	870 806	—	13
As Sb Bi	地质样品	DTPM	—	(0.56~0.84) $mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	—	—	—	14
Au Pd	岩石 矿石	TMK	—	pH=2.8~4.5	557 535	505.5 571.5	—	15
Be	地面水	铬天青 S-癸基二甲基氨基酸-Tween80	—	pH=6.15~6.92	426	614	(0~1.5)μg/25ml	16
Bi	铜合金	三溴偶氮胂	—	$0.3mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	520	630	(0~25)μg/25ml	17
	粗铅	溴邻苯三酚红-cPB · TritonX-100	4.53×10^4	$0.05mol\cdot L^{-1}$ HNO_3	440	640	(0~200)μg/25ml	18
Bi	—	双硫腙	—	pH=8.0~9.0	650	505	—	19
Bi Sb	地质样品	二硫代二安替比林甲烷	—	pH1	—	—	—	20
Bi Cu	—	二乙胺二硫代甲酸钠	—	—	—	—	—	21
Ca	血清水等	三溴偶氮胂	3.1×10^4	pH10.7	490	600	(0~30)μg/25ml	22
		对乙酰基偶氮胂	2.1×10^4	pH10.7	520	630	(0~30)μg/25ml	23
		酸性铬蓝 K		pH=10~11	541	528	0~$1.2\times10^{-5}mol\cdot L^{-1}$	24

续表

待测元素	测定对象	显色体系	ε	显色条件	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围	文献
Mg	—	4-甲基偶氮胂-TB	 1.46×10^4 1.35×10^4	pH10.6	512 561 656	470 613 580	(0~1.4×10^-5)mol·L^-1 (0~25)μg/25ml (0~12)μg/25ml	25
Ca Zn	—	CPA I TPPS$_4$	—	pH4.5	 448	673 421	(0~40)μg/50ml (0~4)μg/50ml	26
Cd	污染水	试镉灵 TritonX 100	—	—	566	477	—	27
		新镉试剂-Trito X-100	2.84×10^5	pH=10.2~11.4	430	525	0~4μg/25ml	28
	大米	Cadion ZB-Tween40		0.02mol·L^-1 NaOH	510	605	0~16μg/25ml	29
Cd Zn	—	5-Br PADAP	—		514	564	—	30
		5-Br-PMPAP-OP	—	pH9	512.5 524	568.5 569	0~12μg/25ml 0~16μg/25ml	31
Cd Cu Mn Ni	— —	5-Br-PADAP CAS PAN 5-Br PADAP	—	pH10	580 583 572 643	553 627.5 562 557	—	32
Cl	水样	硫氰酸汞	—		560	460	(0~15)μg/50ml	33
Co	—	5-Cl-PADAB	—	pH4、pH7	424	570		34
Co Ni	钴硫精矿	PAR	—	pH9.5	480 513	515 498	(0~80)μg/50ml (0~60)μg/50ml	35
	合金钢 岩石	5-Br-PADAP	—	pH5.5	-	—	(0~24)μg/25ml (0~15)μg/25ml	36
Co Fe Ni	—	NRS	..	pH5.5	.....	520 720 550	0~4μg·ml^-1 0~3μg·ml^-1 0~3μg·ml^-1	37
Co Cu Nb	—	PAN	—	—	590 560	520 630	—	38
		PAR	—	--	548	480		
Ta		PAR	—	--	508	570	—	38
Cr	合金钢	邻氯苯基荧光酮			462	497	(0~10)μg/25ml	39
		水杨基荧光酮-CPC	—	pH6.0	520	580	--	40
Cr Mn	铜合金	过硫酸铵	—	—	....	444 556	—	41
	高铬 铸铁		—	—	650.0	446.0 565.0	—	42
Cd Zn	合成 试样	5-Br-PADAP	—	—	514 566	564 514	—	30 43
Co V	合成 试样	5-Br-PADAP-Triton X-100	—	—	565 547	610 598	—	44
Cu	金属 稀土	T(4-TAP)P	1.04×10^6	—	431	410.5	(0~3)μg/25ml	45
	河水	双硫腙锌螯合物 Triton X-100	—	—	671	510	(0~2.5)μg/50ml	46
	海水	T(4MPY)P	—	—	446	423	(0~1.3)μg/25ml	47
		四对(三甲铵苯基)卟吩	—	pH5.7	433	411	—	48
		T(4MPY)P	—	—	430	524	(0.1~1.2)μg/200ml	49
		TADCAB	7.23×10^4	pH4.0	603	492.6	(0~1.2)μg·ml^-1	50
	铝合金, 矿物	DTPPS	7.8×10^5		416	440	(0~0.8)μg/10ml	51
Cu Ti		PAN-OP	—	pH1.2	509	560	(0~70)μg/25ml	52
		PF-OP		—	577	534	(0~3.5)μg/25ml	
	铜钛 合金	H_2O_2-EDTA	—	pH6	— 730	730 370	(0~500)μg/ml (0~200)μg·ml^-1	53

续表

待测元素	测定对象	显色体系	ε	显色条件	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围	文献
Cu Fe	铝合金	5-Br-PADAP	—	pH=3～4.5	604.5 505.8	557.0 592.0	— —	54
		5-Br-PADAP	9.08×10^4 7.61×10^4	pH3.5	542 560	570 512	(0.5～15.0)μg/25ml (0.5～15.0)μg/25ml	55
		5-Br-PADAP	—	pH3	555	600	(0.5～20.0)μg/25ml (0.5～15.0)μg/25ml	56
Cu Ni	—	5-Br-PADAP,PAN	—	—	576 580	544 557		57
Cu Zn	硫化矿	PAN PAR	— —	pH8	520 486	520 550	(0～20)μg/25ml	58
Fe	合金	DAPM	—	pH=2.2～3.2	视体系共存元素定波长对		—	59
	矿物	邻二氮菲	—	—	560	510	—	60
		邻苯二酚紫	7.33×10^4	pH10.5	600	480	(0～10.0)μg/12.5ml	61
Fe(Ⅱ) (Ⅲ)	表面处理液	—	—	—	865 350	940 330	—	62
Fe Ni	铝合金	5-Br-PADAP	—	pH4.5	— 522	746 584	—	63
Fe Ti	矿石硅酸盐	DAPM	—	—	514.9	388	(0～2.0)mg/100ml (0～500)μg/100ml	64
		DAPM	—	$0.5mol\cdot L^{-1}HCl$	513	560 388	—	65
	岩石矿物	钛铁试剂	—	pH4.7	462.2	560 380	(0～100)μg/25ml (0～10)μg/25ml	66
		67钛铁试剂	—	pH4.7	671.8	65 385	—	
		5-Br-PADAP, DAM	—	—	453 647.5	592 389	…	68
		磺基水杨酸	—	pH=3.0～3.5	—	—	—	69
		钛铬试剂	—	pH4.7HAc-NaAc	—	—	—	70
Hg	环境水样	双硫腙铜-Triton X-100	—	pH1	567	493	(0.05～0.25)μg/25ml	71
Hg Pb	—	四(对-三甲铵苯基)卟啉	—	0.016～0.029 $mol\cdot L^{-1}$ NaOH	—	—	$0.092\mu g\cdot ml^{-1}$	72
Hg Zn	—	3,5-diBr-PADAP/SLS	—	pH8.5	562 578	575 568	(0～1.4)μg/25ml (0～10.0)μg/25ml	73
Mg	雨水	二甲苯胺蓝Ⅰ-Triton X-100	—	pH=11～12.5	620	515	(0.1～3.0)μg/25ml	74
	高纯氧化钇	二甲苯胺蓝Ⅱ	—	—	610	526	—	75
	球墨铸铁	偶氮氯膦Ⅰ	3.2×10^4	pH10	500	570	—	76
Ga In	—	CAS-CTMAB	1.13×10^5 1.47×10^5	pH5.7	710	610	$(0.03～0.24)mg\cdot ml^{-1}$ $(0.02～0.4)mg\cdot ml^{-1}$	77
Mo	—	溴邻苯三酚红-乙基紫	3.20×10^5	—	—	—	$(0～0.6)\mu g\cdot ml^{-1}$	78
Mo	钢铁	苯基荧光酮	—	—	524	544	—	79
Ti		-Triton X-100	—		560	—	—	79
Mo W	岩石矿物	SAF-CTMAB	—	$0.6mol\cdot L^{-1}$ HCl	526 514	510 530	—	80
	合金钢	苯基荧光酮-CTMAB	—	(0.3～0.4) $mol\cdot L^{-1}$ HCl	524 515	507 534	(0～35)μg/50ml (0～70)μg/50ml	81
Mo Si Ti	合成试样	SAF-CTMAB	—	—	530 528.6	508.1 541.8	—	82
Ni	—	TAM-Triton X-100	—	pH=6.7～8.5	560	480	(0.3～5.0)μg/25ml	83

续表

待测元素	测定对象	显色体系	ε	显色条件	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围	文献
Nb Ta	钢铁	氯化水杨基荧光酮-CTMAB	—		594 571	560 604	—	84
	—	5-Br-PADAP		0.3mol·L^{-1} H_2SO_4	605 555	464 464	(0~30)μg/50ml (0~50)μg/50ml	85
Nb	矿石	氯代磺酚 S	—		652	630	—	86
Os Pd	—	*p*-PHF	—	pH=7.6~8.0	604.5 530.5	553.5 580.5	(0~9.0)μg/10ml (0~7.0)μg/10ml	87
P	河水	钼蓝	—	0.28mol·L^{-1} $HClO_4$	825	797.3	(0.16~70)μmol·L^{-1}	88
P	铝土矿硅酸盐	钼蓝	—	0.28mol·L^{-1} $HClO_4$	826	791.5	—	89
Pd	—	DDO	—	8mol·L^{-1}HCl	445	538.5	—	90
Pt		DDO		—	—	—	(0~5)μg/ml	91
Pb Zn	水样 废水	5-Br-PADAP	—	pH9.24	557 582	593.2 493.4	—	92
Pd Ru	—	5-Br-PADAP-OP-CTMAB	4.3×10^{5} 1.3×10^{5}	pH4.0	—	488 484	(0~1.0)μg/25ml (0~2.2)μg/25ml	93
Pt Rh	合金	氯化亚锡	—	—	400	612.5	—	94
Pb	—	双硫腙	—	PH=9~10	515	606	—	95
Pt Pd	地质样品	双硫腙	—		600 720	710 638	(0~1.0)μg·ml^{-1}	96
Pt Rh	—	$SnCl_2$	—	(2~3)mol·L^{-1} HCl	—	—	(0~1680)μg/25ml	97
轻稀土 重稀土	稀土矿	二甲酚橙(XO)-CTMAB	—	pH10	620 604	590 629	—	98
轻稀土 重稀土	—	对乙酰基偶氮胂	—	pH2.2	—	—	—	99
稀土	—	对马尿酸偶氮氯膦	—	(0.2~0.6) mol·L^{-1}	670	650	(0~25)μg/25ml	100
稀土	—	对乙酰基偶氮胂,三溴偶氮胂	—	pH=1.3~3.1 pH2.5	542 525	670 650	(0~30)μg/25ml	101 102
稀土	球墨铸铁	双羧基偶氮胂Ⅱ	—	PH=2.5~4	530	640	—	103
稀土总量	合金钢铸铁	偶氮氯膦Ⅱ-CTMAB	—	—	570	722	(1~5)μg/25ml	104
稀土总量	—	磺胺偶氮氯膦	—	pH2.5	—	—	—	105
重稀土	—	MTB-CTMAB	—	pH=6.5~8	660	624	(0~10)μg/25ml	106
Re	—	对溴偶氮胂 Triton X-100	—	PH=4.8~5.9	540	710	—	107
		二甲酚橙-CTMAB	—	pH10	590	620	—	108
Re-Sc	—	氯基 C 酸偶氮氯膦	—	0.8mol·L^{-1} 乙酸	—	—	—	109
Rh	—	5-Cl-PADAB		pH3.26	583	553	(0~25)μg/25ml	110
		$SnBr_2$	—	$HClO_4$ 介质	516	427	(0~2.4)μg·ml$_{-1}$	111
Ru	—	SCN^{-1}-罗丹明 6G	—	pH=1~4	559	527	(0~20)μg/25ml	112
Re	岩石	—	4.5×10^{7}	—	−275	330	<10ng·ml^{-1}	113
	球墨铸铁	对羧基偶氮胂Ⅱ	—	—	530	640	(0~10)μg/25ml	114
	钢铁	偶氮氯膦Ⅱ-CTMAB	—	—	570	722	(1~5)μg/2ml	115

续表

待测元素	测定对象	显色体系	ε	显色条件	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围	文献
Rh Ir	贵金属	MBT	—	—	523	415	(0～100)μg/10ml	116
S	生活水	Ag^+-Cadion 2B	2.65×10^5	—	556	446	(0～20)μg/25ml	117
Sc	尾矿	苯芴酮-表面活性剂	1.95×10^5	pH8.5	515	560	—	118
Sb	铅基合金	溴邻苯三酚红	—	—	590	440	(0～20)μg/50ml	119
Sr	—	三溴偶氮胂	4.6×10^4	—	490	600	(0～9)μg/25ml	120
Th	矿样	DBS-偶氮胂		4mol·L^{-1}HCl	528	636	(0～25)μg/25ml	121
		偶氮氯膦-mA	—	(0.02～0.3) mol·L^{-1}HCl	532	676	(0～40)μg/25ml	122
U Th	—	偶氮氯膦 Ⅱ	—	1mol·L^{-1} HNO_3	—	—	—	123
U	矿石	5-Br^--PAD-AP-F^--CPC	—	pH=5.2～6.0	582	602	(0～70)μg/25ml	124
	废水	TAR	—	—	610	545	(0～50)μg/25ml	125
W	尾矿	硫氰酸盐	—	—	630	405	(0～400)μg/50ml	126
Y Ce	—	XO 桑色素	—	pH7.6	454 618	624 445	(0～40)μg/10ml (0～15)μg/10ml	127
Zn	特级 CCl_4	T(5ST)P	4.17×10^5	—	456	428	(0～3)μg/25ml	128
		亚甲蓝	—	—	675	580	(0～10)μg/25ml	129
Zr	—	水杨基荧光酮-H_2O_2-CTMAB	—	(0.25～0.4) mol·L^{-1}HCl	568	598	—	130
		对羟基苯基荧光酮-H_2O_2-CTMAB	—	(0.1～0.44) mol·L^{-1} HCl	600	563	(0～20)μg/25ml	131
Zr Hf	合成样品	氧化水杨基荧光酮-CTMAB	1.06×10^5	(0.25～0.4) mol·L^{-1} HCl	568 598	598 566	(0～20)μg/25ml (0～20)μg/25ml	132

本表参考文献：

1 李玉珍等. 分析化学. 1992, 20(11):1333
2 张有贤等. 冶金分析. 1984, 4(1): 1
3 巢　来, 崔树花. 分析化学. 1984, 12(9):814
4 丁雪心. 分析化学. 1985, 13(5): 340
5 汤茂烈. 理化检验(化). 1986, 22(2): 94
6 蔫宣宁. 理化检验(化). 1993, 29(6): 12
7 李碧云, 王艳霞. 分析化学. 1982, 10(6): 351
8 罗淑玉等. 分析试验室. 1986, 5(3): 27
9 何锡文等. 分析化学. 1986, 14(8): 565
10 陆晓华等. 理化检验(化). 1989, 25(5): 296
11 陈亚华, 林　琳. 理化检验. 1987, 23(1): 9
12 孙丕均. 地质矿产部分光光度法研究讨论会文集(续集). 053 (1985 年, 合肥)
13 Ohashi K et al., 分析化学(日). 1982, 31(1): PPE1
14 邱淑华, 张东卓. 理化检验. 1990, 26(1): 13
15 雷中利等. 分析试验室. 1993, 12(6): 26
16 陈同森, 杨　静. 理化检验. 1987, 23(6): 333
17 王巧云等. 分析试验室. 1988, 7(1): 61
18 吴太白. 冶金分析. 1988, 8(1): 15
19 李惠芝, 严怡怡. 分析化学. 1985, 13(1): 55
20 张东卓. 分析试验室. 1989, 8(3): 20
21 左成本等. 分析化学. 1983, 11(11): 833
22 孙嘉彦等. 理化检验(化). 1990, 26(2): 72
23 孙嘉彦等. 理化检验(化). 1994, 30(4): 213
24 吴光昕等. 理化检验(化). 1986, 22(5): 273
25 嵇志琴等. 理化检验(化). 1992, 28(3): 142
26 卢继新等. 理化检验(化). 1991, 27(4): 228
27 Watanabe H. et al Talanta. 1979, 26: 959
28 魏复盛等. 分析化学. 1985, 13(10): 762
29 浦炳寅, 魏丹毅. 高等学校化学学报. 1986, 7(7): 585
30 吴家齐等. 分析化学. 1985, 13(2): 132
31 张明英, 宋娟. 理化检验. 1994, 30(5): 292
32 奚长生等. 化学学报. 1987, 45(9): 860
33 张国夫, 王中川. 分析化学. 1980, 8: 292
34 Shibata S et al. Anal. Chim. Acta. 1975, 78: 487
35 罗淑玉, 杨　根. 分析化学. 1986, 14(1): 47
36 李金和等. 分析化学. 1988, 16(4): 311
37 李　梅, 许国英. 分析试验室. 1996, 15(1): 24
38 倪永年. 分析化学. 1988, 16(3): 266
39 王振清等. 高等学校化学学报. 1987, 8(4): 322
40 陈同森, 肖跃坤. 分析化学. 1987, 15(3): 234
41 王志臣, 沈蕙娟. 中国有色金属分析情报网 1985 年光度分析会议论文摘要汇编. C-10 (1985 年, 成都)
42 王汝伟. 理化检验(化). 1995, 31(3): 167
43 邓英平. 中国科技大学学报. 1982, 12: 126
44 黄青瑜, 张黎红. 分析试验室. 1990, 9(3): 61
45 张传铀, 程介克. 化学通报. 1983, 1: 21
46 渡边宽人, 三浦润一郎. 分析化学(日). 1977, 26: 196
47 Watanabe H and Ohmori H. Talanta. 1981, 28(10): 774
48 应　勤等. 理化检验(化). 1986, 22(3): 139
49 Kazuhisa Yoshimura et al., Talanta. 1982, 29(3): 173
50 王莉红等. 化学试剂. 1995, 17(4): 137
51 王进东等. 分析化学. 1991, 19(9): 1036
52 赵书林等. 分析试验室. 1995, 14(2): 5
53 宋婉华. 冶金分析. 1987, 7(1): 5
54 陈亚华, 刘一真. 冶金分析. 1990, 10(1): 17

55 葛宜宁等. 理化检验(化). 1994, 30(4): 223
56 葛宜宁等. 理化检验(化). 1994, 30(3): 152
57 李金和等. 分析化学. 1987, 15(8): 733
58 李 梅等. 理化检验(化). 1990, 26(1): 20
59 梁 荣, 薛章礼. 分析测试通报. 1985, 3: 45
60 张振宇. 分析试验室. 1985, 4(2): 59
61 肖国荣等. 理化检验(化). 1994, 30(1): 41
62 铃木良一等. 分析化学会第26年会要旨集. 1977, 407
63 陈亚华, 时云辉. 冶金分析. 1989, 9(4): 27
64 Zhong Zhan Huan. Anal. Chim. Acta. 1983, 154: 259
65 杨国元. 分析测试通报. 1987, 6(1): 44
66 梁 荣. 冶金分析与测试(冶金分析分册). 1985, 5(4): 54
67 蔡孟礼, 王春阳. 地质矿产部分光光度法研究讨论会文集. 049 (1985年, 合肥)
68 李金和等. 分析化学. 1987, 15(8): 733
69 宋婉华. 分析试验室. 1986, 5(12): 57
70 梁 荣. 冶金分析. 1985, 5(4): 54
71 Keihei Ueno et al. Anal. Chim Acta. 1989, 105: 289
72 方国桢等. 分析化学. 1988, 16(5): 444
73 王亦菲等. 理化检验(化). 1992, 28(6): 330
74 渡边宽人, 田中裕晃. 分析化学(日). 1977, 26(9): 635
75 杨泉生, 黄坚峰. 分析化学. 1980, 8(5): 460
76 劳利文等. 理化检验(化). 1995, 31(2): 112
77 胡家璦等. 理化检验(化). 1992, 28(6): 340
78 沈含熙, 刘跃龙. 高等学校化学学报, 1988, 9(9): 897
79 赵书林等. 冶金分析. 1989, 9(1): 8
80 吴家齐等. 分析化学. 1985, 13(3): 197
81 方国桢等. 分析化学. 1987, 15(11): 1013
82 倪其道等. 分析化学. 1987, 15(5): 418
83 渡边宽人, 大森秀树. 分析化学(日). 1980, 29(2): 137
84 李 滨等. 地质实验(安徽省地质局实验室). 1984, p31
85 王淑人等. 理化检验. 1986, 22(2): 97
86 梁 荣, 崔树花. 分析化学. 1984, 12(9): 814
87 赵 力, 胡守坤. 分析试验室. 1994, 13(2): 28
88 Ohashi Kousaburo et al., Bull. Chem. Soc. Jpn. 1981, 54(6): 1889
89 戴双喜, 杨 定. 中国有色金属分析情报网1985年光度分析会议论文摘要汇编. C-10 (1985年, 成都)
90 刘勋华, 张宁美. 分析化学. 1984, 12(9): 842
91 梁 荣, 薛章礼. 分析化学. 1984, 12(6): 516
92 范锦莺等. 中国有色金属分析情报网1985年光度分析会议论文摘要汇编. C10 (1985年, 成都)
93 李友芬, 柳立新. 理化检验(化). 1995, 31: 34
94 于有江, 陆文阁. 分析化学. 1985, 13(4): 280
95 乔正道等. 理化检验(化). 1991, 27(5): 287
96 李 禾, 伊丽莹. 分析化学. 1992, 20(7): 774
97 黄青瑜等. 四川大学学报(自然科学报). 1982, 4: 101
98 杨泉生等. 分析试验室. 1983, 1: 14
99 杨泉生, 陈 洪. 分析化学. 1984, 12(12): 1098
100 罗 斌, 张晓梅. 理化检验(化). 1987, 23(5): 286
101 杨泉生. 理化检验(化). 1983, 19(1): 20
102 杨泉生等. 分析化学. 1985, 13(11): 864
103 黄坚锋, 杨泉生. 江西大学学报. 1980, 4(1): 31
104 罗庆尧等. 中国稀土学会第一次学术会议论文摘要汇编, 183, (1980年, 北京)
105 康敬万等. 理化检验. 1988, 24(6): 346
106 尹若穰, 宗文莺. 分析化学. 1981, 9(5): 584
107 陈国树等. 分析化学. 1985, 13(11): 840
108 杨泉生等. 分析试验室. 1983, 2(1): 14
109 过乃蓉等. 高等学校化学学报. 1983, 4(5): 637
110 周惠兰等. 分析化学. 1987, 15(4): 349
111 方国桢, 朱小茂. 分析试验室. 1986, 5(9): 16
112 潘玉诚等. 理化检验. 1987, 23(2): 109
113 朱玉伦等. 分析化学. 1991, 19(2): 162
114 杨泉生, 黄坚锋. 江西大学学报. 1980, 1: 31
115 罗庆尧等. 中国稀土学会第一次学术会议论文摘要汇编. 1980, 191
116 李振亚. 分析化学. 1993, 21(2): 224
117 Wei Fu-Sheng Teng Eu-jiang and Rui Kui-Sheng. Talanta. 1984, 31(1): 1024
118 胡可人等. 中国稀土学会第一次学术会议论文摘要汇编. 191 (1980年, 北京)
119 吴太白. 分析试验室. 1988, 7(4): 32
120 曹鉴秋等. 分析试验室. 1990, 9(2): 43
121 欧阳崇学等. 稀有金属. 1986, 10(5): 372
122 尹丽莹. 岩矿测试. 1977, 6(3): 170
123 金同龙等. 分析化学. 1988, 16(5): 479
124 丁俐俐. 分析化学. 1987, 15(1): 71
125 北京第五研究所. 铀矿选冶. 1977, 2: 43; 2, 51
126 杨吉祥, 杨泉生. 分析试验室. 1984, 2: 57
127 李 方等. 化学世界. 1994, 35(11): 591
128 五十岚淑郎等. 分析化学(日). 1983, 32(1): 39
129 张改兰, 张振辉. 江西大学学报. 1989, 13(2): 35
130 李 滨等. 计算机与应用化学. 1984, 1(3): 209
131 梁 荣等. 冶金分析. 1986, 6(2): 32
132 李 滨等. 计算机与应用化学. 1984, 1(3): 209

表 14-7 双波长吸光光度法在药物分析中的应用

待测物质	测定对象	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围/ (μg·ml⁻¹)	文献
氨基比林	安痛定注射液	257	245	5～30	1
安替比林		245	257	40～60	
氨基比林	脑清片	275	258	13.19～18.92	2
咖啡因				4.8～6.7	
乙酰氨基酚	扑感敏片	257	235	—	3
氨基比林		284	271	—	
咖啡因		274	264	—	
氨基比林	脑清片	256	285	—	4
咖啡因		249	263	—	
氨基比林	复方氨基比林注射液	254	249	10～50	5
安替比林		269	233	4～20	
巴比妥		255	239	1.8～9.0	
安替比林	复方扑热息痛注射液	271.5	243	2.5～12.5	6
扑热息痛		238.5	257	2～10	

续表

待测物质	测定对象	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围/ (μg·ml⁻¹)	文献
安替比林	安痛定注射液	233	268	2～12	7
氨基比林	复方氨基比林注射液	—	257	-	8
巴比妥		269	247		
氨基比林		253	279.5		9
保泰松			263.5	6～14	
安替比林	扑感敏片	286	271	—	10
咖啡因		292	277	—	
扑热息痛		292	249	—	
苄丝肼盐酸盐	多巴丝肼胶囊	272	286.9	10～300	11
左旋多巴		280	264.9	20～100	
苯甲酸钠	安钠咖注射液	230	272	6.5～11.7	12
咖啡因		272	230	6.0～10.8	
苯甲醇	苯甲醇注射液	257	240.8	—	13
苯甲酸	水杨酸复方制剂	297	226	4～12	14
苯甲酸钠	安钠咖注射液	256	230	2.5～12.5	6
咖啡因		252.2	272	2.3～11.5	
苯甲酸钠	安钠咖注射液	272	230	5.2～13.0	15
咖啡因				4.8～12.0	
苯甲酸钠	安钠咖注射液	257	230	—	16
咖啡因		253	272		
醋酸洗必泰	复方栓剂	259	354.8	—	17
陈皮苷	陈皮饮	240	283	—	18
橙皮甙	陈皮、川红桔、蛇胆、陈皮末	400	280	—	19
胆酸	人工牛黄	300	240	—	20
猪去氧胆酸					
丁香酚	康齿宁 L 膏	296	280	10～50	21
胆酸	安宫片黄栓	370	690	—	22
山梨酸钾	—	599.5	254	—	23
对羟基安息香酸		235.5	269		
芬布芬	牙周康胶囊	281	341	—	24
甲硝唑			341		
非那西丁	复方乙酰水杨酸片	254	287	30～150	25
咖啡因		285	276.2	5～25	
乙酰水杨酸		227	266	20～100	
奋乃静	奋乃静注射液	254	231.1	1.5～9.0	26
氢氯噻嗪	利降平片	271	360	2.5～3.75	27
磺胺甲噁唑	复方新诺明片	275	265	—	28
甲氧苄啶					
磺胺嘧啶	双嘧啶片		308	10～50	29
甲氧苄啶		308	274.8	7.5～37.5	
磺胺甲噁唑	复方新诺明片	235	249	6.5～17.5	30
甲氧苄啶				1.3～3.5	
磺胺甲噁唑	增胺联磺胶囊	243	265	0.008～0.012	31
磺胺嘧啶		236	242	0.0032～0.0048	
甲氧苄啶		240.5	250		
氢化可的松	麻可滴鼻液	264.6	248	5～20	32
氢溴酸东莨菪碱	氢溴酸东莨菪碱	750	495	—	33
甲氧苄啶	复方头孢氨苄胶囊		270		34
头孢氨苄		—	257		
甲氧苄啶	复方新诺明片	256	287	5～25	35
甲氧苄啶	复方黄连素注射液	271	344	6～20mg/ml	36
甲基炔诺酮	复方甲基炔诺酮片	297	276	—	37
炔雌醇		240	270		
甲硝唑	-	303.1	277	3.0～21.1	38
维生素 B_6		262	290	2.42～19.33	
咖啡因	维磷补汁	292.5	272	1.986～5.958	39
咖啡因	感冒灵胶囊			2.4～8.4	40
扑热息痛		244	291	5.4～14.4	
芦丁	复方芦丁片		359	8～40	41

续表

待测物质	测定对象	参比 λ/nm	测定 λ/nm	线性范围/ ($\mu g \cdot ml^{-1}$)	文献
维生素C		225	263.6	6～18	
氯霉素	氯麻滴鼻剂		278	—	42
盐酸麻黄素		302.5	257		
芦丁	芦丁片	386.1	362.5	—	43
槲皮素		343.4	374.1		
没食子酸	大黄及泡制品	350	271	—	44
嘧氯啶	复方嘧氯啶胶囊	244.8	271	2.048～10.24	45
尿嘧啶		282.7	259	2.096～16.768	
扑热息痛	复方乙酰水杨酸片	274	256.5	1～10	46
扑热息痛	速效感冒片	283.8	258	5～20	47
扑热息痛	感冒头痛粉	268.9	226	4.8～24.0	6
乙酰水杨酸		292.4	249		
扑热息痛	复方扑热息痛片	267	294.5		48
士的宁	马钱子	255	278	5～25	49
麝香酮	含麝香中药制剂	300	365	—	50
头孢氨苄	复方头孢氨苄胶囊	305.5	263	10.06～50.28	51
维生素A	维生素A、E混合液	270.8	305	1	52
维生素E		349.9	292	0.1Iu・ml⁻¹	
维生素B_6	—	400	250	—	53
维生素U	—	700	392	—	54
乌头碱	草乌制剂	400	250		55
硝酸毛果芸香碱	硝酸毛果芸香碱滴眼液	250	208	4～12	56
硝苯吡啶霜		278.5	237		57
盐酸萘甲唑啉	盐酸萘甲唑啉滴鼻剂	241	271		58
盐酸萘甲唑啉	盐酸萘甲唑啉滴鼻剂	242	270	15～45	59
盐酸小檗碱	戊己丸	378	345	2～10	60
盐酸氯丙嗪，盐酸异丙嗪	复方盐酸氯丙嗪片	249 254	258.7 243	0.939～5.634 0.946～5.673	61
盐酸普鲁卡因	盐酸普鲁卡因注射液	—	291	0.15～0.25mg・ml⁻¹	62
PABA		276	264.5		
盐酸溴己胺，盐酸异丙嗪	复方丁氯喘片	286 330	314 298	25～200 10～80	63
盐酸洗必泰	盐酸洗必泰片	315	258		64
盐酸麻黄碱，盐酸苯海拉明	百喘朋片	256 258	259 255	0.2～10mg・ml⁻¹ 0.1～0.5mg・ml⁻¹	65
延胡索乙素	安胃片	270	282	—	66
愈创木酚4-磺酸钾，愈创木酚5-磺酸钾	复方感冒剂	258 300.9	242 239.5	—	67
左旋多巴		264.5	280	—	68

本表参考文献：

1 荆彦芬等．医药工业．1993；24(2)：83
2 徐本明．医药工业．1989；20(4)：174
3 侯美琴等．医药工业．1992；23(2)：81
4 潘福海．药物分析杂志．1984；4(6)：362
5 聂小春等．药物分析杂志．1993；13(3)：190
6 侯美琴等．药学通报．1988；23(11)：680
7 周业康等．药物分析杂志．1983；3(2)：108
8 胡育筑等．南京药学院学报．1982；3：4
9 焦　杨．药物分析杂志．1994；14(5)：48
10 叶飞云等．中国药学杂志．1989；24(11)：671
11 胡占迪等．医药工业．1993；24(7)：313
12 李永康．医药工业．1992；23(10)：455
13 蒋汉民．医药工业．1987；18(5)：226
14 李永康．药物分析杂志．1989；9(5)：310
15 沈玉刚．药学通报．1987；22(10)：608
16 胡育筑等．南京药学院学报．1982；2：29
17 刘汉杰等．医药工业．1988；19(1)：30
18 硅筱铭等．中成药．1988；10：19
19 赵体慧等．南京药学院学报．1984；15(3)：14
20 吴　华．医药工业．1990；21(10)：457
21 朱国健等．医药工业．1988；19(5)：225
22 程洪轩等．中成药．1988；11：16
23 北村正幸，小森伸夫．Hitachi Sci. Instv. News. 1971；14：871
24 周海明．医药工业．1993；24(3)：127
25 于春杰等．医药工业．1992；23(7)：320
26 燕恩慈等．药物分析杂志．1984；4(6)：369
27 沈鹤起等．医药工业．1992；23(7)：318
28 聂善文．医药工业．1988；19(5)：214
29 钱小平等．药物分析杂志．1986；6(5)：305
30 于鉴茂等．药物分析杂志．1988；8(2)：111
31 姚桂榛等．药物分析杂志．1988；8(2)：97
32 李　京等．药学通报．1987；22(7)：418
33 麦　曦等．南京药学院学报．1984；15(3)：14

34 董丽沾等. 医药工业. 1993; 24(1): 28
35 张启明. 医药工业. 1988; 19(10): 463
36 李 彦等. 药物分析杂志. 1988; 8(2): 116
37 相秉仁. 药物分析杂志. 1986; 6(5): 259
38 陈珍珊等. 药物分析杂志. 1994; 14(5): 51
39 林继晓等. 医药工业. 1988; 19(1): 35
40 齐晓飞. 药物分析杂志. 1988; 8(5): 302
41 胡奎三. 医药工业. 1990; 21(2): 61
42 肖翔林. 药学通报. 1987; 22(12): 738
43 何卫民等. 医药工业. 1995; 26(6)264
44 郎爱新等. 中药通报. 1988; 13(7): 404
45 黄宗玉等. 药物分析杂志. 1988; 8(1): 42
46 陈小勤等. 药物分析杂志. 1987; 7(4): 243
47 魏长林等. 药物分析杂志. 1985; 5(1): 52
48 刘广泉. 医药工业. 1991; 22(8): 366
49 祈明馥. 药物分析杂志. 1983; 3(3): 170
50 张广强等. 中药通报. 1987; 12(11): 664
51 高铁勇等. 药物分析杂志. 1986; 6(1): 50
52 太幡利一等. Hitachi Sci. Instr. News. 1971; 14: 871
53 姜心如等. 南京药学院学报. 1984; 15(3); 32
54 赵体慧, 陈玉英. 中国化学会 1980 年分析化学论文报告会论文摘要汇集(下). E21(1980 年,西安)
55 邹恩济等. 中成药. 1988; 18(6): 255
56 项根章等. 药物分析杂志. 1990; 10(3): 176
57 于盛茂, 申庆亮. 中国医院药学杂志. 1989; 9(3): 117
58 张海澄. 药物分析杂志. 1991; 11(3): 43
59 钱丽华等. 药物分析杂志. 1991; 11(3): 167
60 伍 朝等. 药物分析杂志. 1987; 7(1): 34
61 高铁勇等. 药物分析杂志. 1986; 6(1): 50
62 张雪泮. 药物分析杂志. 1986; 6(3): 155
63 唐树荣等. 药物分析杂志. 1985; 5(2): 95
64 张汉儒等. 药物分析杂志. 1985; 5(20): 104
65 韩学静等. 医药工业. 1994; 25(3): 126
66 赵体慧等. 中国药科大学学报. 1989; 20(20): 127
67 井上哲男等. 分析化学(日). 1974; 23; 1289
68 费冬梅. 中国药学杂志. 1989; 24(11): 669

第四节 三波长吸光光度法

一、三波长吸光光度法概述

三波长吸光光度法是在 1980 年提出的[87]，很快在岛津 UV—250 分光光度计上采用而成为一种新方法。

（一）基本原理[85,86]

三波长吸光光度法是在干扰组分的吸收光谱中，在具有线性吸收的三个波长上进行待测组分的吸光度测量，然后求得待测组分含量。设样品溶液在 λ_1、λ_2 和 λ_3 处的吸光度为 A_1、A_2 和 A_3，待测组分的吸光度 ΔA 与 A_1、A_2 和 A_3 有如下关系：

$$\Delta A = A_2 - \frac{mA_1 + nA_3}{m+n} = \left(\varepsilon_{\lambda_2} - \frac{m\varepsilon_{\lambda_1} + n\varepsilon_{\lambda_3}}{m+n}\right)cb \qquad (14\text{-}16)$$

式中，$m=\lambda_2-\lambda_3$；$n=\lambda_1-\lambda_2$；ε_{λ_1}、ε_{λ_2}、ε_{λ_3} 分别为待测组分在三个波长处的摩尔吸收系数；c 为待测组分的浓度，$mol \cdot L^{-1}$；b 为吸收池厚度。

由上式可知，ΔA 与待测组分的浓度成正比。

对两组分混合物，运用三波长分光光度法进行测定时，波长组合的选择原则是：

①干扰组分的 ΔA 为零；

②待测组分的 ΔA 值尽可能大。

（二）三个波长组合的选择方法

1. 等吸收点法

如果在干扰组分的吸收光谱上能找到 3 个等吸收点，且在此 3 个波长处，待测成分有较大的 ΔA，可应用此法来选择。

2. 作图计算法

不满足等吸收点法要有的条件时，先在待测组分吸收曲线上选取吸光度差别较大的 2 个波长作为 λ_1 和 λ_2。然后通过作图，即将干扰组分吸收曲线上 λ_1 和 λ_2 处两点联线延长交于干扰组分吸收曲线上得第三点，其波长即为 λ_3。这样粗选得出 3 个测定波长，然后采用不同浓度的干扰组分的溶液进行 λ_3 的精选。

3. 计算机选择法[43]

双波长法和三波长法的灵敏度一般低于常规单波长法的灵敏度。为获得相同的灵敏度，可采用补偿计算法。

二、三波长吸光光度法应用

表 14-8　三波长吸光光度法在药物分析中的应用

被测组分	测定对象	文献	被测组分	测定对象	文献
盐酸氯丙嗪	盐酸氯丙嗪注射液	1	氨茶碱，扑尔敏	制锒灵片	20
咖啡因，苯甲酸钠	安钠咖注射液	2	甲基炔诺酮，炔雌醇	甲基炔诺酮片	21
氨基比林，安替比林	复方氨基比林注射液	3	盐酸氯丙嗪，盐酸异丙嗪	复方氯丙嗪片	22
氢氯噻嗪	常药降压片	4	毛果芸香碱	硝酸毛果芸香碱滴眼剂	23
盐酸普鲁卡因	对氨基苯甲酸	5	陈皮甙	二陈丸	24
盐酸丁卡因	盐酸丁卡因注射液	6	绿原酸	清热解毒注射液	25
甲氧苄氨嘧啶(TMP)	复方磺胺制剂	7	盐酸苯丙醇胺，扑尔敏	复方盐酸苯丙醇胺片	26
磺胺甲氧吡嗪（SM-PZ）	复方磺胺甲氧吡嗪片	8	头孢氨苄（CEX）、甲氧苄啶（TMP）	复方头孢氨苄胶囊	27
扑热息痛	速效感冒片	9	对乙酰氨基酚，安替比林	复方注射液	28
呋喃唑酮	溃疡灵	10	士的宁	痹症散	29
甲硝基羟乙唑	灭滴灵栓剂	11	磺胺甲基异噁唑，甲氧苄胺嘧啶	抗菌优（复方磺胺甲噁唑）	30
二乙酰邻苯二酚	滴见灭栓剂	12	安必欣	胶囊	31
二萜原酸酯	芫花根注射液	13	维生素 E	防裂霜	32
盐酸小檗碱	三黄片	14	异烟肼，利福平	复方利福平胶囊	33
扑热息痛	复方感冒灵	15	双氯灭痛	凝胶剂	34
SMZ，TMP	复方新诺明片	16	黄芩甙	小柴胡汤颗粒剂	35
双羟萘酸噻嘧啶、双羟萘酸酚嘧啶	复方噻嘧啶片	17、18			
盐酸苯海拉明，盐酸麻黄碱	复方麻黄碱片（别名咳喘片）	19			

本表参考文献：

1　罗国安，张国清等．南京药学院学报．1984；15(2)：25
2　张汉儒．药物分析杂志．1985；5(2)：92
3　王桂珍，何培健．药物分析杂志．1985；5(3)：148
4　胡育筑，于如嘏．南京药学院学报．1984；15(2)：19
5　兰琪田等．南京药学院学报．1984；15(3)：26
6　邢仁英，王芳芳等．中国医院药学杂志．1989；9(5)：215
7　吴　 析，罗国安．药物分析杂志．1986；6(1)：10
8　胡育筑，缪建荣等．南京药学院学报．1984；(15)3：42
9　魏长林，刘文汉．药物分析杂志．1986；6(4)：226
10　黄美声，沈玉刚．药学通报．1987；22(2)：72
11　李毓琴．药物分析杂志．1986；6(3)：157
12　贡瑞生．山东医药工业．1987；6(3)：26
13　王明治，郭寅龙等．中国药科大学学报．1988；19(2)：100
14　张广强，梁生旺等．中成药研究．1988；(2)：15
15　李宁伍．药物分析杂志．1986；6(5)：286
16　刘承叶．药物分析杂志．1986；6(4)：213
17　何植洵．药物分析杂志．1990；10(3)：179
18　黄宗玉，张　 霆．现代应用药学．1987；4(2)：34
19　胡育筑，缪建荣等．南京药学院学报．1984；15(2)：37
20　姜忠佩，刘文武．药物分析杂志．1988；8(2)：115
21　孙茂峰，吴宏晞等．中国药科大学学报．1988；19(2)：145
22　蓝琪田等．中国药科大学学报．1988；19(2)：135
23　杨　 燕等．中国药学杂志．1991；26(1)：38
24　薛　 清等．中成药．1991；13(2)：14
25　张广强．中国中药杂志．1990，15(8)：481
26　马　 林等．化学世界．1991；32(5)：218
27　闻　 毓等．中国医药工业杂志．1991；22(5)：216
28　何为民．中国医药工业杂志．1990；21(8)：365
29　任大伟．中国中药杂志．1991；16(9)：545
30　张有贤等．分析化学．1992；20(6)：707
31　于　 潞等．中国药学杂志．1994；29(5)：286
32　张　 云．中国医院药学杂志．1994；14(10)：454
33　汤乐红等．中国医药工业杂志．1995；26(3)：111
34　蔡瞻玲等．中国医药工业杂志．1994；25(11)：551
35　盛坤贤等．中成药．1994；16(6)：13

第五节　正交函数吸光光度法

一、正交函数吸光光度法概述

正交函数吸光光度法[92]的基本原理就是在吸收曲线的某一区域内选择适当的正交多项式，使干扰组分的正交多项式的系数最小，以致可以忽略不计，用待测组分的正交多项式的系数进行定量分析。

正交多项式回归模型为

$$A_a=P_0\varphi_0(\lambda_a)+P_1\varphi_1(\lambda_a)+P_2\varphi_2(\lambda_a)+\cdots+P_n\varphi_n(\lambda_a)+\varepsilon_a \tag{14-17}$$

式中 A_a——在波长 λ_a 处的吸光度观察值；

$\varphi_0(\lambda_a),\varphi_1(\lambda_a),\cdots,\varphi_n(\lambda_a)$——在满足自变量 λ 可以控制而采取等间隔条件下选配的一组正交多项式；

P_0，P_1，…，P_n——分别是正交多项式的回归系数；

ε_a——在 λ_a 处对 A_a 观察值的随机误差。

上式表示任一吸收曲线（在一小区域内）都可以由若干个正交多项式 $\varphi_0(\lambda_a),\varphi_1(\lambda_a),\cdots\cdots,\varphi_n(\lambda_a)$ 按各自的回归系数（P_0，P_1，……，P_n）为权重的线性组合来拟合。正交多项式的基本曲线图形如图 14-3 所示。

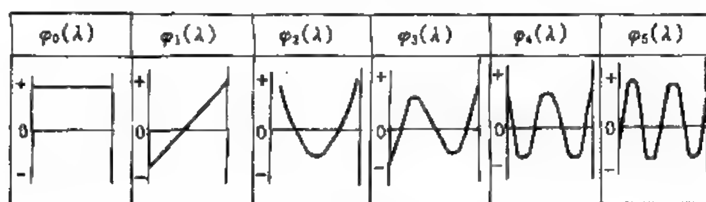


图 14-3 正交多项式基本图形
所有图的横坐标均为一组等间隔波长
（测试点 $N=12$）

回归系数 P_0，P_1，……，P_n 的值采用最小二乘法来确定，可由下式计算：

$$P_0=\frac{1}{N}\sum_a A_a=\bar{A}；\quad P_j=\frac{\sum_a A_a\varphi_j(\lambda_a)}{\sum_a \varphi_j^2(\lambda_a)}=\frac{\sum_a A_a\varphi_j(\lambda_a)}{N_j} \tag{14-18}$$

式中 A_a——所选波长区间内等间隔的各点波长处测得的吸光度；

N——测试波长点数（$N\geqslant j+1$，j 是正交多项式次数）。

N_j（归一化因子）及 $\varphi_j(\lambda_a)$ 由“正交多项式表”中查得。

在混合组分的测定时，混合物的吸收曲线是由其各组分吸收曲线加和而成，而每一组分的吸收曲线又可分解成相应的加了权重后的基本正交多项式之和，因此，可以根据待测组分与干扰组分的吸收曲线的形状，参照图 14-3 基本正交多项式的图形合理选择正交多项式 $\varphi_j(\lambda)$、波长区间、测试波长数目 N 和波长间隔 $\Delta\lambda$ 后、使干扰组分的 P_j 小到可以忽略不计，则求出的正交多项式的回归系数 P_j 可把待测组分的特征性贡献从混合吸收中分离出来，从而求得该组分的含量。

正交函数吸光光度法有 P_j 法、ΔP_j 法和复合多项式法等，这里仅对 P_j 法作简要介绍。

首先绘制混合样品和各组分标准品的吸收曲线。根据待测组分和干扰组分的吸收曲线形状正确选择正交函数法的 4 个重要参数。

①波长区间的选择 原则是使待测组分的曲线形状与干扰组分的曲线形状有显著的不同。

②特征多项式的选择是在上述波长区间内待测组分标准品吸收曲线的形状与正交多项式的基本曲线相同或相近。

③波长点数(N)应符合 $N\geqslant j+1$，对形状不太复杂的曲线一般取 6 点或 8 点波长进行。

④波长间隔 $\Delta\lambda$ 由波长区间和波长点数而定。

按选定的 4 个参数值，测取样品的一组吸光度，按 $P_j=\sum_{a=1}^{N}A_a\varphi_j(\lambda_a)$ 计算 P_j（样），然后由比较法，标准曲线法和回归方程法求出 c_s。

二、正交函数吸光光度法的应用

1956 年，Ashton 和 Tootill[88]首次应用正交函数法测定肉汤发酵样品中灰黄霉素含量，1963 年 Glenn[89]提出了 P_j 法；1972 年，Abdine[90]等提出了 ΔP_j 法；1974[91]年，Wahbi 和 Ebel 提出了 P_w 法，使该方法在药物和生化分析领域得到广泛应用。

表 14-9 给出了正交函数分光光度法部分应用实例。

表 14-9　正交函数分光光度法应用实例

待测组分	样品名称	干扰组分	P_j	N	$\Delta\lambda$/nm	波长区间 λ_{max}/nm	文献
酚	肾上腺素、酚合剂	肾上腺素	P_3	12	3	264～297	
酚		肾上腺素	P_2	12	2	270～292	1
肾上腺素		酚	P_2	12	2	270～292	
扑尔敏	扑尔敏片	乳糖	P_2	8	6	264.5	
苄苯醇胺二氢枸橼酸盐	苄苯醇胺二氢枸橼酸盐片	乳糖	P_2	8	6	263	
盐酸苯海拉明	盐酸苯海拉明片	乳糖	P_3	8	3	247.5	2
盐酸麻黄碱	盐酸麻黄碱片	乳糖	P_4	8	3	249.5	
			P_5	8	2	256	
硫酸阿托品	硫酸阿托品注射液	苯基硝酸汞	P_4	11	2	252～272	
			P_4	12	1	249～260,255～266	3
			P_5	12	1	251～262,253～264	4
四环素	四环素片、糖浆	—	P_2	6	20	343～443	5
萘甲唑啉	萘甲唑啉、安他心合剂	安他心	P_2	6	6	270.5～300.5	6
双氢可待因	双氢可待因、那可丁合剂	那可丁	P_2	14	2	281	7
制霉菌素	制霉菌素	分解产物	P_4	8	4	298～326	8
维生素 A 棕榈酸盐	维生素 A 油剂	未皂化的油	P_2	6	5	315～340	9
苯巴比妥	苯巴比妥、苯妥英胶囊	苯妥英	P_2	6	6	226～256	10
溴化羟苯乙胺	安胃灵片	乳糖、洗必太	—	—	—	—	11
链霉素	链霉素合剂	双氢链霉素	P_2	6	10	250～300	
双氢链霉素		链霉素	P_2	6	8	242～282	12
氯苯甲嗪	氯苯甲嗪片	维生素 B_6	P_2	6	4	222～242	13
泼尼松龙	泼尼松龙、氢化可的松合剂	苯肾上腺素	P_2	6	12	231.5～291.5	
氢化可的松		新霉素	P_2	6	8	241.5～281.5	14
黄体酮	黄体酮、丙酸睾丸素油剂	油	P_2	6	20	338～438	15
扑热息痛	扑热息痛片、糖浆、栓剂	赋形剂	P_2	6	2	240～250	16
氨茶碱	氨茶碱制剂	赋形剂	P_2	6	4	266～286	17
甲苯磺酰丁脲	甲苯磺酰丁脲片	赋形剂	P_2	6	4	250～270	18
维生素 D	维生素 D 油注射液	未经皂化杂质	P_2	6	10	250.5～300.5	
		经皂化杂质	P_2	6	10	246～296	19
乙酰唑胺	乙酰唑胺片	赋形剂	P_2	6	4	256～276	
			ΔP_2	6	4	256～276	
氢氯噻嗪	氢氯噻嗪片	赋形剂	P_2	6	2	268～278	20
			ΔP_2	6	2	268～278	
壬苯醇醚	壬苯醇醚避孕薄膜	尼泊金乙酯	P_2	6	4	263～283	21,22
保泰松	复方氨基比林、保泰松片	氨基比林	P_2	6	5	232～257	23
硝呋甲腙	硝呋甲腙、呋喃	—	P_2	6	10	309～359	24
呋喃唑酮	唑酮合剂					345～395	
盐酸克喘素	复方芫花酮片	芫花酮	P_2	6	2	292～302	25
盐酸罂粟碱	—	苯巴比妥、颠茄	P_2	5	2	242～258	26
氢氯噻嗪	常药降压片	双肼酞嗪	P_2	6	4	261～281	27
氨基比林	氨咖片	咖啡因	P_2	6	8	239～279	
			ΔP_2	8	8	226～282	28

续表

待测组分	样品名称	干扰组分	P_j	N	$\Delta\lambda$/nm	波长区间 λ_{max}/nm	文献
磺胺二甲嘧啶	小儿安	磺胺脒	P_2	6	12	242～302	29
盐酸苯海拉明	咳喘片	盐酸麻黄碱	P_2	6	2	239～249	
			$8P_2-9P_3$	6	3	240.5～255.3	29
盐酸氯苄咪唑	盐酸氯苄咪唑片	赋形剂	ΔP_2	8	4	238～266	30
苯妥英	苯妥英糖浆	乳糖	ΔP_2	6	6	222～252	31
新安替根	新安替根片	赋形剂	ΔP_2	8	4	222～250	32
烟肼酰胺	烟肼酰胺片	赋形剂	ΔP_2	8	10	232～302	32
氯喹	氯喹片	赋形剂	ΔP_2	12	2	324～346	32
氨基比林	氨基比林片	赋形剂	ΔP_2	8	8	224～280	32
呋喃苯胺酸	呋喃苯胺酸		ΔP_2	6	2	275～285	33
安乃近	安乃近片	赋形剂	ΔP_2	8	6	236～278	34
扑热息痛	去痛片	阿斯匹林、可待因	ΔP_3	8	2	256～270	
阿斯匹林		扑热息痛、可待因	ΔP_2	8	2	324～338	35
潘生丁	复方潘生丁片	舒宁				288～328	
舒宁		潘生丁	ΔP_2	6	8	272～312	36
水杨酰胺	—	磷酸氯喹	$6P_2+P_3$	12	2	228～250	37
维生素 B	维生素 B	降解产物	$2P_2-P_3$	12	6	226～292	38
对氨基苯甲酸	盐酸普鲁卡因注射液	盐酸普鲁卡因	ΔP_2	6	12	228.6～288.6	39
盐酸普鲁卡因		对氨基苯甲酸	$3P_2+4P_3$	12	4	272～316	40
苄青霉素		氨苄青霉素	P_3-P_4	12	2	247～269	
氨苄青霉素	—	苄青霉素	P_2+2P_3	12	2	249～271	41
甲基苯巴比妥	—	—	—	—	—	—	42
氨基比林	安痛定注射液		P_2	6	4	240～280	43
炔雌醇	复方甲基炔诺酮片	甲基炔诺酮	P_2	6	2	240	44
甲基炔诺酮		炔雌醇	P_1	6	5	255.5	
芫花酯甲	芫花根注射液	—	P_1	10	1	240～250	45
二萜原酸酯类			P_2	11	2	234	46
扑热息痛	复方扑热息痛注射液	安替比林	P_2	6	8	228～268	47
甲灭酸	—	—	ΔP_2	6	12	326～386	48
氯灭酸			ΔP_2	6	12	322～382	
氨茶碱	珠贝定喘片	—	—	—	—	—	49
VC,芦丁	复方芦丁片	—	—	—	—	—	50
芍药甙	小建中合剂	—	—	—	—	—	51
头孢氨苄	胶囊	—	—	—	—	—	52
橙皮甙	枳术丸	—	—	—	—	—	53

本表参考文献：

1 Glenn A L J. Pharm. Pharmcol. 1963;15;123T
2 Abdine H et al. J. Pharm. Pharmacol. 1971;23;444
3 Wahbi A M et al. Pharmazie. 1971;26;291
4 Wahbi A M et al. JAOAC. 1981;64;855
5 Wahbi A M. J. Drug Res. 1971;3;215[CA;77;105655k]
6 Abdine H et al. J Pharm. Phermcol. 1972;24;518
7 Wahbi A M et al. Z. Anal. Chem. 1974;270;282
8 Amer M M et al. J. Pharm. Pharmacol. 1975;27;377
9 Amer M M. Indian J. Technol. 1975;13;564[CA,84;169721f]
10 Amer M M. J. Pharm. Pharmacol. 1977;29;355
11 Amer M M. J. Drug Res. 1977;9;203[CA,97;186139h]
12 Wahbi A M et al. Pharmazie. 1977;32;690
13 Hassan S M et al. Z. Anal. Chem. 1978;292;400
14 Amer M M et al. Pharmazie. 1978;33;344
15 Wahbi A M. Pharmazie. 1978;33;278
16 Elsayed M. A. JAOAC. 1979;62;549
17 Elsayed M. A. J. Pharm. Sci. 1979;68;9
18 Elsayed M. A. JAOAC. 1979;62;533
19 Hassan S M. JAOAC. 1979;62;545
20 Elsayed M A et al. Analyst. 1980;105;222
21 杨仲元等. 南京药学院学报. 1980;14;54
22 董善士等. 南京药学院学报. 1980;(2); 64
23 杨仲元等. 南京药学院学报. 1981; 16; 37
24 Idassan S M et al. Z. Anal. Chem. 1981; 308; 24
25 梅志英等. 南京药学院学报. 1981; 16; 31
26 Vexgeichik E N et al. Farm. Zh(Kiev). 1982;(5);66 (Ukrain)
27 徐嘉凉等. 南京药学院学报. 1982; 20; 15
28 张建新等. 药学学报. 1984; 19; 146
29 张建新等. 药学学报. 1984; 19; 367
30 Abdine H et al. J. Pharm. Pharmacol. 1972; 24; 522
31 Amer M M et al. Ibid. 1977; 29; 291
32 Wahbi A M et al. Pharmazie. 1978; 33; 96
33 Hassan S M et al. JAOAC. 1978; 61; 695
34 Elsayed M A et al. Analyst. 1979; 104; 568
35 Elsayed M A et al. Analyst. 1979; 104; 620
36 Korany M A et al. JAOAC. 1982; 65; 144
37 Wahbi A M et al. J Pharm. Pharmcol. 1972; 24; 518
38 Wahbi A M et al. Analyst. 1981; 106; 960
39 张建新等. 药学学报. 1986; 21; 712
40 Wahbi, A. M. et al., JACOAC. 1981; 64; 1179
41 Wahbi, A. M. et al. Pharmazie. 1982; 37; 641
42 Wahbi, A. M. et al. Talanta. 1982; 29(11A); 931

43 马 杰. 药物分析杂志. 1985; 5: 242
44 张正行等. 南京药学院学报. 1984; 15: 19
45 相秉仁等. 南京药学院学报. 1986; 17: 119
46 王明治等. 药学学报. 1986; 21: 119
47 马 杰. 医药工业. 1986; 17: 361
48 Hassan, S. M. et al. Pharmazie. 1984; 39: 691
49 黄诺嘉等. 中成药. 1991; 13(8): 15
50 冯德民等. 药物分析杂志. 1990; 10(1): 29
51 杨立伟等. 中成药. 1992; 14(2): 10
52 于治国等. 沈阳药科大学学报. 1995; 12(2): 109
53 杨士伟等. 西北药学杂志. 1994; 9(6): 251

第六节 导数吸光光度法

一、导数吸光光度法概述

(一) 导数光谱及获得导数光谱的方法

导数光谱是指吸收光谱对波长的一阶或多阶导数对波长的函数，如图 14-4 所示。

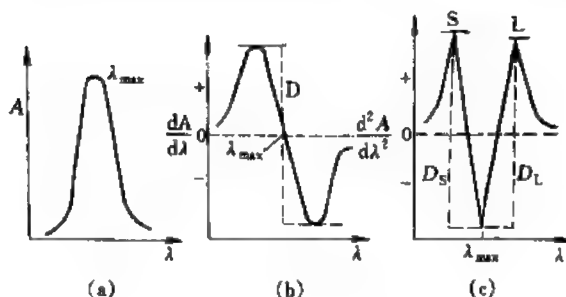


图 14-4 导数光谱示意图

(a) A-λ (零阶); (b) $\frac{dA}{d\lambda}$-λ (一阶); (c) $\frac{d^2A}{d\lambda^2}$-λ (二阶)

获得导数光谱的方法分为三大类，第一类为光学方法，其中包括波长调制法[93~95,111~119]、双波长扫描法[96,97,120~122]和固定狭缝法[98]等；第二类为电子学法又叫电子微分法，用 RC 微分电路和运算放大器组成模拟微分电路[98~100]和位移记忆法[98]；第三类是数值微分法[98~100,103~110]，是将吸收光谱数字化，再用计算机进行拟合、平滑和求导等数学处理。获得导数光谱方法还有一些其他文献[123~128]。

(二) 导数吸光光度法定量测定原理

对通用吸收定律进行一次微分，则一阶导数为

$$\frac{dA}{d\lambda}=bc\frac{d\varepsilon}{d\lambda} \tag{14-19}$$

若进行 n 次微分，则 n 阶导数为

$$\frac{d^nA}{d\lambda^n}=bc\frac{d^n\varepsilon}{d\lambda^n} \tag{14-20}$$

由上式可看到，各阶导数始终与试液浓度呈直线关系，这就是导数分光光度法进行定量测定的原理。

导数吸光光度法的基本原理见文献［129～134］，有关导数光谱性质的评述见文献［135～144］。

(三) 导数光谱的测量方法及主要的仪器参数

1. 测量方法

在一定条件下，导数信号与待测物浓度成正比。测量导数信号一般有 4 种方法：

(1) 几何测量法　此法是以导数光谱上合适的振幅作为定量信息。振福的测量方法有基线法 (切线法)[145]、峰-峰法 (峰-谷法)[146]、峰-零法等[146]。此外还有峰-比率法[147]、零交截距法[148~151]、面积法[152]和校正系数法[152,153]等。

(2) 代数计算法[154]　包括一次干扰吸收的代数校正和二次干扰吸收的代数校正。

(3) 非特征吸收校正法。

(4) 组合导数光谱法[155] 此方法是将双波长 K 系数法的基本原理对导数光谱进行适当的数学解析，另外还有将等吸收点法和差示法和导数光谱相结合的所谓等导数值导数光谱法[156]和示差导数光谱法[157]等。

2. 主要的仪器参数

(1) 狭缝 灵敏度随狭缝变小而减小，但狭缝太小时，信噪比变坏，一般选用 (0.5～2) mm。

(2) $\Delta\lambda$ 值 灵敏度随 $\Delta\lambda$ 增大而增高，但 $\Delta\lambda$ 过大，分辨率降低。

(3) 扫描速度 扫描速度增加，灵敏度增大，而分辨率下降。

(4) 时间常数 为获得好的分辨率，选用小的时间常数。在高阶导数光谱中，为提高信噪比，可采用较大的时间常数。

(5) 横轴扩展因子 横轴扩展因子增大，灵敏度降低。

在导数光谱中随着导数阶次的增加，信噪比越来越差。若零阶导数的噪声的标准差为 σ_0，未经平滑的 n 阶导数的噪声的标准偏差为[158]：

$$\sigma_n=\sigma_0\sqrt{\sum_{m=0}^{m}\left(\frac{n!}{(n-m)m!}\right)^2}$$

通过平滑[159,160]可以减小噪声，但平滑化也带来新的问题，表现为峰高的降低和峰宽的增加，从而降低了光谱的有效分辨率。

有关导数吸光光度法测量精密度和准确度的讨论及影响测量的因素见文献 [161～166]。

(四) 导数吸光光度法的特点

(1) 提高灵敏度及放大微弱吸收峰。研究指出导数光谱的灵敏度和导数阶次、$\Delta\lambda$、以及半峰宽存在着复杂的关系，在通常的仪器上只有半峰宽小于 30nm 的体系才有可能通过导数光谱提高灵敏度，而且灵敏度随导数阶次和 $\Delta\lambda$ 的增加而增加[167]。

(2) 提高选择性。导数吸光光度法对重叠吸收带理论分辨问题的研究从 50 年代以来不断有所报道，如计算等高、等宽及不等高、不等宽的两个重叠的高斯型带的二阶，四阶导数光谱的分辨情况[168,169]。有人从量子化学角度讨论了导数光谱重叠谱带的相互干扰问题，得到了一些理论标准和误差公式[170]。其他的有关文献还有 [171～175]。

(3) 识别肩峰。当大的宽峰和小的锐峰重叠时，或在大峰的急剧上升部分所掩盖的弱小的锐峰时，导数光谱可以识别弱的小峰[176,177,98]。

(4) 消除背景干扰[97,117,178]。

(5) 确定宽阔吸收带的最大峰位。

二、导数吸光光度法应用

表 14-10 导数吸光光度法在无机分析中的应用

待测元素	测定对象	显色体系	显色条件	测定 λ/nm	导数阶数	线性范围 (ε)	文献
Ag	岩矿	溴邻苯三酚红-1,10-邻菲啰啉-Triton X-100	—	—	四阶	—	1
Al	原油自来水渣油	CAS-TritonX-100-乙醇	pH6.5	548	二阶	(0.4～16)μg/25ml	2
Al，Fe	纯硅	CAS-OP	pH6.5	606.2 638.0	一阶	(0.3～10)μg/25ml (1.0～16)μg/25ml	3

续表

待测元素	测定对象	显色体系	显色条件	测定 λ/nm	导数阶数	线性范围 (ε)	文献
Be	绿柱石	铍试剂Ⅲ		520	三阶	(0~0.4)μg·ml^{-1}	4
Be, Mg	—	1-羟基-2-羧基蒽醌	pH11	492 463	一阶	(0.04~0.4)μg·ml^{-1} (0.1~1.5)μg·ml^{-1}	5
Bi	—	2-硫代巴比土酸	pH=1.2~1.7	416	一阶、二阶	(2.4×10^4)	6
Bi, Pb	纯锡	HCl-NaCl	3mol·L^{-1}HCl 2mol·L^{-1}NaCl	—	四阶	(1~24)mg·L^{-1} (8.4×10^3)(8.3×10^3)	7
Ca	—	对乙酰基偶氮酸	pH2	—	四阶	(0~4)μg/25ml	8
Cd		T(3-MPY)P T(4-MPY)P	—		二阶	—	9
Co	钢样.铁	DPBH	—	530 504	二阶	(2.5×10^4) (3.43×10^4)	10
Co	血中	THAM	—	470.430	二阶	—	11
Co, Cd	—	5-Br-PADAP	—	605 574	一阶	(0~0.6)μg·ml^{-1} (0~0.34)μg·ml^{-1}	12
Co, Cu	—	EDTA	pH=6~8	—	—	—	13
Co, Fe	镍	硫氰酸铵-丙酮	—	—	一阶	—	14
Co, Mn	铬钢	—	—	—	二阶	—	15
Co, Ni	—	5-Br-PADAP	pH5.7	587 560	一阶	(0~5.89)μg/10ml (0~5.87)μg/10ml	16
Co	—	1-羟基蒽醌 2-羧酸	—	—	二阶	—	17
Ni	—	苄基-2-吡啶酮-2-喹啉基腙	pH9.0	518 480	—	—	18
	镍矿石	DMTAMB	pH=5.0~5.5	-	一阶	(0~24)μg/25ml	19
Co, V	—	2-甲基-4-[1,2,4-三唑偶氮-3)间苯酚	pH8.1	—	二阶	—	20
Co, Zn	—	5-Br-PADAP	pH9.2	566 605	一阶	—	21
Cu	—	EDTA			一阶	(0.5~61.2)μg·ml^{-1}	22
		四(3-*N*-甲基吡啶)卟啉	—	—	二阶	(1~16)μg·L^{-1}	23
Cu, Zn	水样纯稀土	T(4—TAP)P	pH=7.7~9.5	385、395 408	四阶	(0~1.2)μg/10ml	24
		T(4—TAP)P	pH4.5	—	—	—	25
Lu, Zn, Ni	—	PAN	pH4.8	595 557 547	二阶	(0.5~3.0)μg·ml^{-1} (0.5~2.5)μg·ml^{-1} (0.3~2.0)μg·ml^{-1}	26
Dy, Yb	稀土氧化物	—	—	840~1000	四阶	(0.5~5.0)μg·ml^{-1} (0.5~5.0)μg·ml^{-1}	27
Dy, Gd, Nd, Sm	—	—	—	518.2 267.8 361.7 399.7	二阶 二阶 二阶 四阶	(0.5~4.0)μg·ml^{-1} (0.5~3.0)μg·ml^{-1} (0.05~0.4)μg·ml^{-1} (0.05~0.3)μg·ml^{-1}	28
Er, Ho	—	—	—	$\lambda_1$525.4 $\lambda_2$518.5 637.6 534.0	一阶	(0~3.0)×10^{-3}mol·L^{-1}	29
Er, Nd	混合稀土	—	—	—	三阶	(4.5~21)μg·ml^{-1} (3.0~18)μg·ml^{-1}	30
Er, Ho, Nd	合成样品	TTA-4-甲基喹啉	pH=6~7	—	—	—	31
Er, Nd, Ho	混合稀土	DBM-Triton X-100	—	600~420	三阶	—	32
Er, Ho, Nd	—	—	pH6.5	—	三阶	(0~1000)μg·ml^{-1}	33
Er, Ho,	—	TTA	—	517 446	三阶	(0~0.5)mg·ml^{-1} (0~0.1)mg·ml^{-1}	34

续表

待测元素	测定对象	显色体系	显色条件	测定 λ/nm	导数阶数	线性范围(ε)	文献
Nd, Tm Eu, Sm	—	—	—	568,734 786,790 390.6 389	二阶	(0~1)mg·ml^{-1} (0~1.0)mg·ml^{-1} —	35
F	—	镧-茜素氨羧结合剂	—	—	一阶	—	36
Fe	废水天然水	1,10-邻菲罗啉	—	—	一阶	(0.48~48)μmol·L^{-1}	37
Fe(Ⅱ)	水	DPBH	—	—	二阶	40μg·L^{-1}	38
Fe(Ⅱ)	饮用水	TPTZ	—	—	二阶	20μg·L^{-1}(3.25×10^{4})	39
Fe	矿质水	2-14,5-二甲基-2-噻唑基偶氮-4,6-二甲基[illegible]	—	—	二阶	—	40

续表

待测元素	测定对象	显色体系	显色条件	测定 λ/nm	导数阶数	线性范围(ε)	文献
U		偶氮胂Ⅲ	—	—	一阶	$(0.1\sim0.8)\mu g\cdot ml^{-1}$	70
							71
Y 轻稀土	合金钢	偶氮氯膦-PN	—	—	一阶	—	72
Zr	岩矿	偶氮胂Ⅲ	$7.2mol\cdot L^{-1}$ $HClO_4$	…	四阶	(4.19×10^5)	73
	银钯合金	PicraminE	$5mol\cdot L^{-1}HCl$	—	一阶	—	74
		对马尿酸偶氮氯膦	—	620,680	一阶	$(2\sim30)\mu g/25ml$	75

本表参考文献：

1 陈元荣，王国忠. 中国有色金属情报网 1985 年光度分析会议论文摘要汇编. C-12(1985 年，成都)
2 王 林等. 理化检验. 1992；28(3)：139
3 王作录，王新辉. 理化检验. 1996；32(1)：13
4 Zhu Y and Shao J. Analyst. 1989；114(1)：97
5 Salinas F et al. Analyst. 1987；112(10)：139
6 Morrelli B et al. Analyst. 1982；107：282
7 李建军等. 分析化学. 1986；14(8)：597
8 陈 瑛等. 武汉大学学报. 1986；3：79
9 Ishii H et al. Talanta. 1982；29：542
10 Singh R B et al. Analyst. 1984；109(1)：42
11 杨胜军. 分析化学. 1985；13(10)：760
12 江淑芙等. 分析测试通报. 1992；11(3)：80
13 Bermejo-Berrera A et al. Analyst. 1985；110(11)：1313
14 江崇球等. 分析化学. 1988；16(3)：263
15 郑朱梓. 理化检验. 1987；23(2)：85
16 张书圣等. 化学试剂. 1995；17(1)：5
17 Murillo A et al. Analyst. 1988；113(9)：1439
18 Hernandez M et al. Quim. Anal. (Barcelona)，1988；7(3)：341
19 胡 翠等. 分析化学. 1992；20(12)：1439
20 Jimenez I et al. Analyst. 1989；114(1)：93
21 江淑芙等. 理化检验. 1992；28(4)：210
22 Bermejo Barrera，A et al. Quim. Anal(Barcelora)，1985；7(2)：212
23 石井一，高英昌. 日本化学杂志. 1980；97(1)：203
24 李华民、严君凤. 分析化学. 1987；15(1)：52
25 魏 玲等. 分析试验室. 1988；7(1)：1
26 Gallardo A et al. Analyst. 1989；114(1)：109
27 阎 雁，任 英. 分析化学. 1990；18(10)：897
28 劳光启. 理化检验. 1992；28(16)：353
29 谢文海. 稀土. 1995；16(3)：31
30 王乃兴等. 分析化学. 1993；21(1)：90
31 白光弼，王哲明. 理化检验. 1986；22(6)：322
32 李金和等. 分析化学. 1988；16(8)：696
33 白光弼等. 理化检验. 1987；23(6)：322
34 任 英. 分析化学. 1985；13(1)：6
35 Hajime I and Katsuhiko S Z. Anal. Chem. 1982；312：114
36 Ferris M M et al. Anal. Proc(london). 1988；25(3)：58
37 Katsuyama T et al. Bull. Chem. Soc. Japan. 1985；58(3)：868
38 Singh R B et al. Analyst. 1983；108；1120
39 石井一，小田岛次胜. 分析化学(日). 1980；29：558
40 Sanchez M J et al. Anal. Lett. 1988；21(12)：2345
41 王尊本等. 分析化学. 1987；15(3)：251
42 李华民. 地质矿产部分光光度法研究讨论会 I 募(续集). 54(1985 年，合肥)
43 Шарматлидр. Ж. Анал. Хим. 1988；43(6)：1037
44 Aleksandrova N N et al. Zavod. Lab. 1988；54(5)：15.(Russ)
45 王长发，张 雷. 岩矿测试. 1987；6(2)：81
46 朱玉伦，邢济馨. 岩矿测试. 1986；5(4)：259
47 史慧明，孔令根. 痕量分析. 1989；5(2)：18
48 Sanderink G J C M et al. Tijdschr. Ned. Ver. Klin. Chem. 1985；10(6)：232(Neth)
49 Sharma L K et al. Talanta. 1989；36(4)：457
50 Medinilla J et al. Talanta. 1986；33(4)：329
51 林瑞英. 分析化学. 1987；15(4)：318
52 史慧明等. 分析化学. 1989；17(10)：879
53 张晶玉等. 应用化学. 1990；7(5)：34
54 史慧明等. 化学试剂. 1990；12(6)：321
55 渠 荣等. 分析化学. 1985；13(10)：732
56 Suzukin R. Mikrochim. Acta. 1987；47
57 俞 英等. 理化检验. 1996；32(1)：22
58 王长发. 分析化学. 1988；16(3)：239
59 Mainowska E et al. Chem. Anal. (Warsaw). 1986；31(5/6)：797
60 王长发. 分析化学. 1986. 14(11)：805
61 王 林等. 分析化学. 1990；18(7)：661
62 郭采文. 中国有色金属情报网 1985 年光度分析会议论文摘要汇编. C-15(1985 年，成都)
63 潘教麦等. 分析试验室. 1994；13(1)：29
64 渠 荣，薛章礼. 分析化学. 1984；12(6)：516
65 许慧卿，秦建候. 分析化学. 1984；12(6)：504
66 买光昕等. 化学世界. 1987；28(1)：22
67 牛淑云等. 分析化学. 1985；13(8)：589
68 胡新成等. 分析化学. 1989；17(2)：103
69 吴茂槐等. 分析化学. 1990；18(7)：683
70 Кварацхелиидр. Ж. Анал. Хим. 1981；36(10)：2054
71 Кварацхелиидр. Ж. Анал. Хим. 1988；43(1)：93
72 孙若诚，马玉珊，中国稀土学会第四次全国稀土分析论文报告会论文摘要汇编，1-52(1984 年，西安)
73 王长发. 岩矿测试. 1988；7(1)：1
74 Кварацхелиидр. Ж. Анал. Хим. 1983；38(8)：1434
75 王青跃. 化学试剂. 1986；8(2)：76

表 14-11 导数吸光光度法在药物分析中的应用

待测物质	测定对象	测定 λ/nm	导数阶数	线性范围/ (μg·ml⁻¹)	文献
安眠酮	安眠酮血药	230～250	一阶	0～5.0	1
阿苯达唑	阿苯达唑片	239	一阶	5～30	2
安定	安定注射液	315～343	二阶	—	3
阿斯匹林 咖啡因	片剂	258.2 244.2	一阶	—	4
阿斯匹林、水杨酸	—	—	二阶	—	5
氨苄青霉素钠、邻氯青霉素钠	—	—	二阶	—	6
氨苄青霉素钠、双氯青霉素		—	二阶	—	7
安定、利眠宁、去氧羟基安定	—	—	二阶	—	8
安他唑啉、麻黄素、苯肾上腺素	滴眼剂	—	一阶	—	9
苯丙氨酸、色氨酸	复合氨基酸注射液	—	二阶	—	10
苯甲酸钠、咖啡因	片剂	—	二阶	—	11
苯巴比妥、孕甾醇、麻黄苯丙酮、苯甲酸雌二醇	栓剂 制剂 悬浮液	—	二阶	—	12
苯二氮䓬类	—	—	二阶	—	13
苯妥英	—	—	一阶	—	14
苯甲酸钠 咖啡因	安钠咖注射液	241 269	一阶	6.5～19.5 9～33	15
苯巴妥、去羟甲基安定	—	—	一阶	—	16
苯丙烯啶、美沙芬、扑尔敏	复方药片	—	二阶	—	17
伪麻黄碱	—	—		—	18
苯甲醇、2-苯基乙醇、3-苯基丙醇、4-苯基丁醇	防腐剂	—	二阶	—	19
舒宁、苯甲二氮䓬	药剂	—	二阶	—	20
保泰松、呱醋茶碱、盐酸辛可卡因、羟保泰松、糖精钠	药物		一阶	—	21
苯巴比妥	治痛灵片	245	一阶	—	22
茶碱	喘静片	200～300	一阶	5～25	23
雌二醇	复方雌三醇栓	260～340	一阶	5～30	24
茶碱	复方茶碱片	261，286	一阶	—	25
	茶碱血药	284，288	一阶	—	26
醋酸曲安缩松	醋酸曲安缩松注射液	267	一阶	10～30	27
胆红素	安宫牛黄丸	—	一阶	—	28
丁卡因、可卡因、利多卡因、普佐卡因、普鲁卡因	—	—	二阶	—	29
对乙酰基氨基酚	速效感冒胶囊	305.5	一阶	—	30
毒扁豆碱、氢溴酸东莨菪碱、毛果芸香碱	滴眼剂	—	二阶	—	31
对乙酰氨基酚	咳喘感冒片	274.6，304.6	一阶	5～25	32
胆酸	人工牛黄及复方制剂	320～450	二阶	0～0.5	33
对乙酰氨基酚	复方制剂	220～300	一阶	—	34
二羟丙茶碱、盐酸溴己胺	复方制剂	—	一阶	—	35
呋喃唑酮	溃疡灵胶囊	—	一阶	—	36
甘氨酸甲砜霉素	药物制剂	—	二阶	—	37
枸橼酸维静宁	咳必清糖衣片	262，258，254	一阶	—	38
磺胺二甲基嘧啶、磺胺脒	小儿胺散	—	一阶	—	39
磺胺醋酰钠	复方利福平滴眼液	—	一阶	—	40
海洛因、吗啡	—	—	—	—	41
合成鱼腥草素	止喘消痰片	296	一阶	3.5～6.5	42
环丙沙星	盐酸环丙沙星滴眼液	—	—	—	43
N-甲基苯并[*f*]喹啉硫酸甲酯、盐酸宋齐拉敏	洗眼剂	—	三阶	—	44
金霉素	鼻眼净滴鼻剂	408	二阶	—	45
咖啡因	片剂	200～310	一阶	—	46
克霉唑	克霉唑癣药水	268～280	二阶	0.24mg·ml⁻¹	47
克霉唑	克霉唑栓	266.2	一阶	—	48
利福平	利福平胶囊	435	一阶	55～90	49
赖氨酸	复方赖氨酸冲剂	251	一阶	75～220	50
氯霉素	氯霉素片	225.6，298	一阶	5～40	51

续表

待测物质	测定对象	测定 λ/nm	导数阶数	线性范围/ $(\mu g \cdot ml^{-1})$	文献
氯霉素 水杨酸	复方氯霉素洗剂	258.1，296.6 241.6，274.1	一阶	—	52
氯硝安定	氯硝安定栓	327	一阶	—	53
氯丙嗪及其亚砜化物	制剂	—	三阶	—	54
利多卡因	利多卡因丁卡因注射液	260～270	三阶	(0.2～0.4) $mg \cdot ml^{-1}$	55
赖氨匹林	赖氨匹林制剂	250～330	一阶	(0.5～2.5) $mg \cdot ml^{-1}$	56
美沙芬、伪麻黄碱	复方美沙芬片	232，217	一阶	—	57
麻黄碱	止咳糖浆	250～280	一阶、二阶	—	58
马兜铃酸	血浆	249，257	二阶	1.25～20	59
人工牛黄	感冒通片	550～650	一阶	—	60
诺氟沙星	诺氟沙星片	266	二阶	4～16	61
诺氟沙星	诺氟沙星胶囊	264～286	一阶	1～11	62
扑热息痛	—	270，274	一阶	—	63
吡哌酸	吡哌酸片	275，285	二阶	1～11	64
扑尔敏	咳特灵胶囊	300～220	一阶	—	65
扑热息痛、盐酸异丙嗪	息热痛注射液	—	—	—	66
扑热息痛	V_c 银翘片	239～276	一阶	—	67
皮质甾醇类	药物	—	一阶	—	68
盘尼西林	—	—	一、二、三阶	—	69
4-羟基苯氧基青霉素	苯氧基甲基青霉素	—	四阶	—	70
炔雌醇、孕酮	混合物	—	二阶	—	71
炔诺酮、炔雌醇	复方炔诺酮片	257～242 290～283	二阶	20～100 1.4～7.0	72
色氨酸	复方氨基酸注射液	285，283	四阶	5～80	73
三唑仑	三唑仑片	231～219	二阶	4～20	74
双氯芬酸	双氯芬酸凝胶	300	一阶	5.01～30.06	75
水杨酸	阿斯匹林	300～350	一阶	—	76
水杨酸	乙酰水杨酸	—	—	—	77，78
游离水杨酸	阿斯匹林片剂	316	一阶	1～20	79
水杨酸	阿斯匹林粉	292，316	二阶	—	80
土霉素	尿液	368，402	一阶	—	81
头孢匹林钠、头孢呋新钠	纯品注射液	—	一、二阶	—	82
头孢哌酮钠、头孢孟多甲酸酯	—	—	一、二阶	—	83
维生素 B_6、烟酰胺	口腔溃疡灵胶囊	308；274	二阶	—	84
维生素 E	维生素 E 软胶囊	300～250	一阶	—	85
维生素 E	维生素 E 片剂	260～300	一阶	20～120	86
辛弗林	四川杂枳实	320～260	一阶	—	87
西咪替丁	西咪替丁注射液	228.5	一阶	2～12	88
硝基咪康唑	皮炎霜	228～233	二阶	—	89
苋菜红、胭脂红	不透明胶囊	523 542	二阶	2～16 2～15	90
烟酰胺	复方叶酸红 B_{12} 注射液	—	一阶	—	91
盐酸环苯醇	片剂、针剂	—	二阶	—	92
盐酸左旋咪唑	盐酸左旋咪唑片	250～300	一阶	—	93
盐酸平痛新	盐酸平痛新片剂	273.4，266.9	二阶	50～250	94
盐酸双氧异丙嗪	小儿克咳敏冲剂	380～310	一阶	11.4～57.2	95
盐酸苯海索	—	218，222	一阶	—	96
盐酸美沙酮	盐酸美沙酮片	340～240	二阶	(0.171～1.0262) $mg \cdot ml^{-1}$	97
延胡索乙素	血浆	289，295	二阶	25～100	98
盐酸奎宁	复方奎宁注射液	337	一阶	27～136	99
盐酸黄连素	盐酸黄连素片	358	一阶	—	100
盐酸萘甲唑啉	鼻眼净滴鼻剂	250～330	二阶	—	101
盐酸布比卡因	复方硫酸庆大霉素注射液	268	二阶	—	102
盐酸普鲁卡因	盐酸普鲁卡因制剂	303～323	二阶	4～12	103
盐酸异丙嗪	小儿清肺止咳糖浆	230～290	二阶	1～8	104
异烟肼 维生素 B_6	复方异烟肼片	252 301	一阶	5～25 2.5～12.5	105

续表

待测物质	测定对象	测定 λ/nm	导数阶数	线性范围/ (μg·ml⁻¹)	文献
盐酸苯海拉明	盐酸苯海拉明片	227，231	一阶	8～16	106
盐酸溴己胺	止咳消痰片	260～230	二阶	—	107
盐酸去氯羟嗪	复方氯喘片	264～268	三阶	10～60	108
烟酸	维生素糖丸	262～266	二阶	2～30	109
盐酸苯海拉明、盐酸麻黄碱	百喘朋片	230；216	二阶	—	110
愈创木酚甘油醚	愈喘气雾剂	276～281	二阶	—	111
盐酸异丙肾上腺素		470			
左旋多巴	复方左旋多巴制剂	220～320	二阶	24～120	112

本表参考文献：

1 王亦军等. 药物分析杂志，1989；9(3)：172
2 吴月萍等. 医药工业，1991；22(2)：75
3 于盛茂等. 医药工业，1988；19(7)：311
4 Onur, Feyyaz et al. Ankara Univ. Eczacilik Fak. Derg. 1989；19(1-2)：11-18(Turkish)
5 Kitamura K et al. Chem. Pharm Bull. 1984；32(4)：1484
6 Morelli B. Anal. Chim. Acta. 1988；209(1/2)：175
7 Morelli B. J. Pharm. Sci. 1988；77(12)：1042
8 Abdel-Hamid M E et al. Acta Pharm. Jugost，1984；34 (3)：183
9 Korany M A et al. Anal. Lett. 1985；18(B1)：21
10 张景剑等. 分析化学，1985；13(2)：117
11 ВергичукЕ. Н. мдр. фармации (Москва). 1986；35(5)：43
12 Traveset J et al. J. Pharm. Sci. 1980；69：629
13 Abdel-Hamid M E et al. Anal. Lett. 1984；17(B12)：1353
14 Al-Julani A M Anal. Lett. 1985；18(B11)：1375
Mura P. et al. Pharm. Acta. Helv. 1987；62 (8)：226
15 温晓红. 药物分析杂志，1988；8(3)：187
16 El-Yazbi F A et al. J. Pharm Belg. 1985；40(4)：244
17 Murtha J L et al. J. Pharm. Sci. 1988；77(8)：715
18 Jones r et al. J. Pharm. biomed. Anal. 1985；3(4)：335
19 Fell A F，J. Pharm. Pharmacol. 1978；30：63
20 Abdel-Hamid，et al. Acta. Pharm. Jugosl. 1984；34 (3)：189
21 Korany M A et al.，Farmaco Ed. Pract (意大利)，1984；39(7)：243
22 张凤荣. 医药工业，1994；25(1)：31
23 张秀清等. 药物分析杂志，1992；12(6)：348
24 秦鸿生等. 药物分析杂志，1991；11(5)：294
25 尹 全. 药物分析杂志，1990；10(3)：166
26 胡微扬等. 药物分析杂志，1988；8(4)：217
27 傅利道等. 医药工业，1996；27(3)：121
28 李荣士，钞 沂. 中草药，1987；18(3)：112
29 Arufe M I Martinez et al. J. Anal. Toxicol. 1988；12 (4)：192
30 李松梓. 药学通报，1988；23(1)：36
31 Fell A F. Proc. Anal. Divisi. Chem. Soc. 1978；15：260
32 胡魁三等. 药物分析杂志，1991；11(4)：232
33 曾俐峰等. 医药工业，1995；26(10)：455
34 侯 莉. 医药工业，1988；19(5)：222
35 唐树荣，药学学报，1996；21(10)：776
36 沈玉刚，黄美声. 中成药研究，1988；2：12
37 Nobile L et al.，Int. J. Pharm. 1987；40(1/2)：85
38 李 萍等. 药物分析杂志，1989；9(2)：109
39 董 春. 药学学报，1987；22(10)：781
40 张宗仁，姜 玉. 中国药学杂志，1989；24 (10)：609
41 Lawrence A H et al.，Anal. Chem. 1984；56(9)：1731
42 王 锦等. 医药工业，1995；26(9)：403
43 周延安等. 医药工业，1994，25(11)：503
44 Vetuschi C et al. Spectrosc. Lett. 1989；22 (1)：41
45 刘桂桢. 医药工业，1994；25(2)：82
46 Onur Feyyaz et al.，FABAD Farm. Bilimber Derg. 1989；14(1)：1-8(Turkisn)
47 胡敏燕. 药物分析杂志，1990；10(2)：115
48 周业康. 药物分析杂志，1986；6(6)：359
49 黄 蘅. 医药工业，1995；26(8)：357
50 赵 庄等. 医药工业，1996；27(3)：127
51 胡清宇等. 医药工业，1994；25(7)：312
52 周家胜等. 医药工业，1994；25(7)：314
53 陆进方. 医药工业，1993；24(3)：131
54 Fasanmade A A et al. Analyst. 1985；110 (9)：1117
55 李 桦. 药学通报，1987；22(4)：221
56 李太平. 医药通报，1987；22(9)：546
57 邢 东. 医药工业，1995；26(8)：359
58 姜 永等. 药物分析杂志，1986；6(5)：289
59 刘布鸣等. 药物分析杂志，1983；3(5)：288
60 胡德福等. 药物分析杂志，1991；11(3)：175
61 王 蕾等. 医药工业，1996；27(2)：73
62 张君仁等. 医药工业，1993；24(9)：413
63 辛 勤. 药物分析杂志，1988；8(2)：107
64 张君仁等. 医药工业，1995；26 (8)：361
65 曹 媛等. 医药工业，1994；25(9)：407
66 林黎明. 药学学报，1988；23(1)：49
67 吴子超等. 药学通报，1988；23(12)：736
68 El-Yazbi et al. Alexandria J. Pharm. Sci. 1987；1(1)：1-4 (Eng)
69 Park，Man Ki et al. Soul taehakkyo Yakhak Nonmunjip，1987；12：67-75 (Korean)
70 Klvacs-Hadady K et al. Analyst. 1988；113(4)：569
71 Corti P et al.，Boll. Chim. Farm (意大利). 1983；122 (6)：281
72 曹雨震等. 药物分析杂志，1984；4(1)：31
73 曹雨震等. 药物分析杂志，1989；9(3)：180
74 杨亚莉等. 医药工业，1995；26(10)：459
75 张先洲等. 医药工业，1996；27(3)：123
76 孙莉莉等. 药物分析杂志，1985；5(1)：23
77 Mazzeo P et al. J. Pharm. Pharmacol. 1982；34(7)：470
78 Kitamura K et al.，Anal. Chem. 1983；55(1)：54
79 刘艳春. 药物分析杂志，1994；14(2)：46
80 Kitamura K et al. Anal. Chem. 1983；55(1)：54
81 林黎明等. 医药工业，1992；23(5)：220
82 Morelli B. Analyst. 1988；113(7)：1077
83 Morelli B. Anal. Lett. 1988；21(5)：759
84 史学慧等. 药物分析杂志，1991；11(2)：110

85 刘汉杰等. 药物分析杂志，1987；7(5)：307
86 燕恩慈等. 药物分析杂志，1985；5(5)：295
87 朱正义. 药物分析杂志，1987；7(2)：100
88 陈 鸣. 医药工业，1996；27(1)：22
89 陈 波. 医药工业，1993；24(7)：318
90 张雅青等. 药物分析杂志，1985；5(5)：299
91 史泳醇，林 琳. 中国药科大学学报，1988；19(2)：129
92 Jones R et al. J. Pharm. Pharmacol. 1981；33 (7)：458
93 梁李广等. 药物分析杂志，1992；12(4)：238
94 陈合山. 药物分析杂志，1991；11(3)：173
95 李毓琴. 药物分析杂志，1990；10(5)：299
96 钱月中等. 药物分析杂志，1988；8(1)：53
97 靳建中. 药物分析杂志，1988；8(2)：110
98 刘布鸣等. 药物分析杂志，1988；8(5)：299
99 黄建楷等. 医药工业，1994；25(3)：118
100 许柄灿. 医药工业，1994；25(8)：355
101 叶飞云等. 医药工业，1994；25(1)：25
102 朱雪芳等. 医药工业，1994；25(10)：457
103 何卫民. 医药工业，1993；24(5)：223
104 刘 本等. 医药工业，1993；24(10)：468
105 刘福清等. 医药工业，1992；23(11)：503
106 袁继民等. 医药工业，1987；18(5)：225
107 陶宙熔等. 药物分析杂志，1987；7(1)：52
108 黄宗玉等. 药物分析杂志，1986；6(4)：227
109 楼幼武等. 药物分析杂志，1983；3(3)：137
110 王 蕙等. 药物分析杂志，1985；5(2)：110
111 杨清华等. 药物分析杂志，1984；4(3)：148
112 梅晓健等. 药物分析杂志，1992；12(3)：172

第七节 动力学吸光光度法[1]

一、动力学吸光光度法概述

动力学吸光光度法是以测量反应物浓度与反应速率之间的定量关系为基础，用紫外-可见分光光度计为检测手段的一种吸光光度法。该方法在反应未达平衡时便可进行测定，因而扩大了可利用的化学反应的范围，并提高了选择性和灵敏度，使吸光光度法有了新的发展。

近20多年来动力学吸光光度法有了很大的发展，已发表了大量的研究论文和综合论述并出版了专著[179~181]。1983年在西班牙召开了第一届国际动力学分析会议，1985年我国也召开了首届动力学分析法讨论会，至今已举办了多届。70年代后，专为动力学测定方法设计的微型计算机控制的分光光度计的问世，加速了这方法的发展。

动力学吸光光度法一般可分为三类[182,183]：①催化动力学方法，包括酶催化动力学分析法；②非催化动力学方法，包括速差动力学分析法；③诱导方法。有关动力学分析法中的一些基本概念和基础知识可参见有关文献。

以催化反应为基础的分光光度法，可用于催化剂、抑制剂和活化剂的测定。催化法是直接或间接监测催化反应的速率，在直接法中待测组分起催化剂作用，在间接法中待测组分起抑制剂和活化剂的作用。在酶催化动力学分光光度法中可用于酶的活性测定、底物的测定、激活剂和辅酶的测定及抑制剂的测定。

非催化法是通过测量非催化反应的速度来确定反应混合物中的单一组分或同时测定多种组分。

速差动力学分光光度法是基于各组分与同一试剂反应速率差别来进行测定的，主要用于性质相似混合物多组分的同时测定。

诱导方法是根据在一定低浓度范围内，诱导反应的诱导期与诱导体浓度呈简单线性关系，由此来进行定量测定。

用动力学分光光度法测定物质浓度时，常用的测量方法有：起始斜率法（或称正切法）、固定时间法和固定浓度法等。

（一）起始斜率法

此法是先配制一标准系列（至少3个），每隔一定时间分别测定反应产物 x 的浓度并作图，得到一组直线［见图14-5 (a)］，再用外推法将时间外推到零而求出各直线的起始斜率 $\tan\alpha_i$。然后将 $\tan\alpha_i$ 与对应浓度 c_i 作图［见图14-5 (b)］即为校正曲线。测定样品的起始斜率 $\tan\alpha_x$，

由图［14-5（b）］可求得样品中被测组分的浓度 c_x。

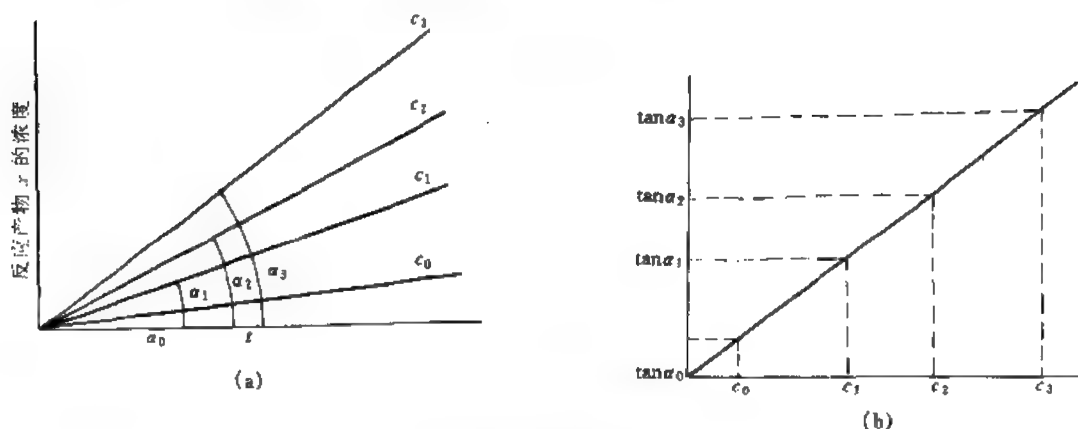


图 14-5　正切法

（a）正切值 $\tan\alpha_i$ 测定；（b）校正曲线

（二）固定时间法

固定时间法的原理是测定固定时间区间内吸光度变化，建立后者与待测浓度的关系。

反应物的起始浓度 c_0 与在固定时间间隔 Δt 内测得的吸光度差 ΔA 的关系为：

$$c_0=\left\{\frac{e^{kt_1}}{\varepsilon bc1-e^{-k\Delta t}}\right\}\Delta A \tag{14-21}$$

如每次均固定由时间 t_1 起取 Δt，则上式中括弧内为一常数，以 c_0 对 ΔA 作图得校正曲线。由此可进行测定。当 $t_1=0$ 的情况下，固定时间法的 A-t 图和 ΔA 与 c_0 的校正曲线见图 14-6。

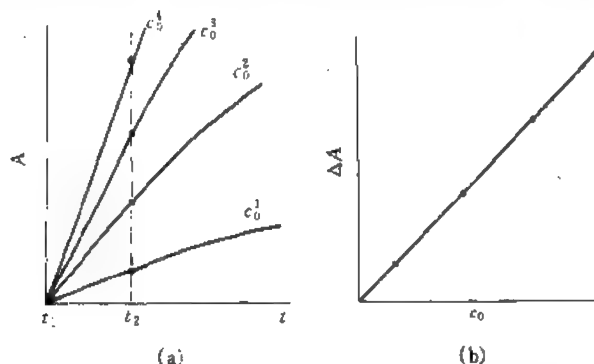


图 14-6　固定时间法

（a）求 $t_1=0$ 至 t_2 的吸光度值 A 的变化；（b）校准曲线

（三）固定浓度法

固定浓度法的原理是测定某一反应组分浓度变化一定数值所需时间 Δt。

对一般化学反应，当 $t_1\to 0$，Δt 很小时可得：

$$c_0=\left\{\frac{\Delta A}{\varepsilon bk}\right\}\frac{1}{\Delta t} \tag{14-22}$$

如取固定的 ΔA 值，以与 ΔA 值对应的时间间隔长度 Δt 的倒数 $1/\Delta t$ 对 c_0 作图，可得直线，见图 14-7。在实际分析中，当反应混合物的组成达到固定不变时，准确测定反应时间 t，即可根据校正曲线来确定被测物质或催化剂的浓度。

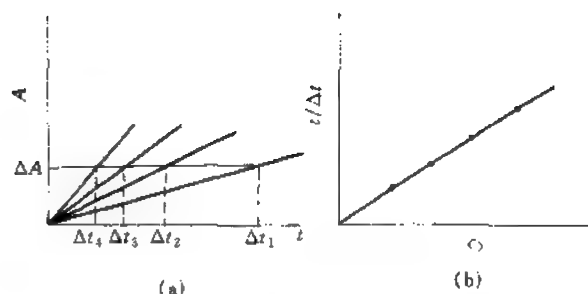


图 14-7 固定浓度法

(a) 由 A-t 直线求出固定 ΔA 时对应的 Δt_i 值；(b) $1/\Delta t$-c_0 标准曲线

二、动力学吸光光度法应用

表 14-12 动力学吸光光度法应用实例

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
Ag(Ⅰ)	Mn(Ⅱ)-$(NH_4)_2S_2O_8$(100℃)	流水冷却	535	(0.01～0.15)μg/10ml Ag	废水，矿石	1,2
	硫脲-$K_4Fe(CN)_6$(60℃)	流水冷却	615	(0.01～0.15)ng·ml^{-1} Ag	矿石	3
	联吡啶-$K_4Fe(CN)_6$-(硫脲)	—	540	—	水，高纯 Li_2CO_3，AgCl 溶度积	4
	$(NH_4)_2S_2O_8$-还原型罗丹明 B-(α,α′-联吡啶)	EDTA	560	(0～2)μg/25ml Ag	水	5
	$K_2S_2O_8$-甲基红(褪色)(α,α′联吡啶)	—	—	(8～56)ng·ml^{-} Ag	AgCl 溶度积	6
	$K_2S_2O_8$-溴酚蓝(褪色)(phen[2])	NaOH	587	(0～0.4)ng/20ml Ag	矿石	7
	$K_2S_2O_8$-溴甲酚绿(α,α-联吡啶作活化剂)	·	610	(5×10^{-4}～2×10^{-2})μg·ml^{-1}	铜矿	8
	乙二胺-$K_2S_2O_8$-还原型酚酞	--	550	(0～2.4)μg/40ml	水样	9
	过硫酸铵-还原型酚酞-乙二胺	—	550	(0～2.4)μg/40ml	污水	10
	过硫酸铵-Mn(Ⅱ)	—	530	(0～0.004)μg·ml^{-1}	—	11
	过硫酸铵-二苯胺磺酸钠-苯胺盐酸盐	—	510	(0.01～0.09)μg·ml^{-1}	铅锌矿	12
	过硫酸钾-考马斯亮蓝	—	560	(0.02～0.16)μg/25ml	铅	13
	过硫酸钾-还原型酚酞(α,α′-联吡啶为活化剂)	—	550	(0～115)μg·l^{-1}	自来水、污水	14
	过硫酸铵-Mn^{2+}	—	530	(0.01～0.1)μg/10ml	化探样品	15
	硫脲-$K_4Fe(CN)_6$(60℃，15min)，pH4	流水冷却	419.6	(0～3.5)μg/25ml	…	16
	$K_2S_2O_8$-胭脂红(褪色)pH5，(α,α′-联吡啶)	—	505	(2.0×10^{-4}～2.4×10^{-2})μg·ml^{-1}	—	17
	$K_2S_2O_8$-偶氮荧光桃红(褪色)，(pH5，α,α′-联吡啶)	—	—	(2.0×10^{-4}～4.0×10^{-2})μg·ml^{-1}	矿石	18
	Ce(Ⅳ)-Cl^--茜素氨羧络合剂-F^-	—	—	—	矿物	19
	O_2-$K_4[Fe(CN_6)]$	—	—	—	—	20
	phen-过硫酸铵-茜素紫 3B	—	—	—	矿，水	21
	phen-$K_4[Fe(CN_6)]$	—	—	—	水	22
	$K_2S_2O_8$-甲基红-联吡啶	—	—	—	—	23
	$KMnO_4$，光照催化分解	…	—	—	水	24
	联吡啶-$K_2S_2O_8$-罗丹明 B	-	—	—	水	25
Au(Ⅲ)	金硫酸络合物对铈(Ⅳ)-汞体系催化	—	..	(0.3～500)μg·L^{-1}	地质样品	26
	甲酸还原钼磷酸	..	700		地矿	27
	NaH_2PO_2-Te(Ⅳ)-脲素-乳化剂 OP[Mn(Ⅱ)]	..	580	(0～0.3)μg/18ml Au	地质样品	28

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
Au(Ⅲ)	$Hg_2(NO_3)_2$-$Ce(SO_4)_2$	流水冷却	375	(0～300)ng/12ml Au	矿石	29
	NaH_2PO_2-磷钼杂多酸-($HgBr_2$-二甲基甲酰胺)	流水冷却	700	(0～500)ng/10ml Au	矿石	30
	Ce(Ⅳ)(黄)+Hg(Ⅰ)(褪色，1.2mol·L⁻¹H_2SO_4)	加过量Cl^-，使Hg_2Cl_2沉淀	410	(2.5～25)ng/10ml	矿石	31,32
	甲酸还原硅钼酸[Hg(Ⅱ)助催化，100℃热(4～7)min] $K_2S_2O_8$氧化[Fe^{2+}(phen)$_3$]褪色	流水冷却	700	(0.1ng～0.07)μg/10ml (0.5～2.0)ng/5ml	镀金废水 矿石	33,34
	硅钼酸-甲酸	—		—	废水	35
Bi	PbO_2^--$SnCl_2$(强碱介质)	—	—	(5～60)ng·ml⁻¹	植物、土壤、水样	36
Br^-	$KBrO_3$-甲基红(褪色)	流水冷却	524	(0～15)μg/25ml Br^-	化学试剂	37
	I_3^--$KMnO_4$	CCl_4萃取I_2	350	—	地质样品	38
	$KBrO_3$中性红，抑制$KBrO_3$-罗丹明B	—		—	镁，硫铵 水	39, 40,41
Cd(Ⅱ)	Co(Ⅱ)-四-(4磺基苯)卟啉(咪唑)	EDTA +NaOH	432	(0.5～16)ng·ml⁻¹ Cd	废水	42
Ce(Ⅳ)	KI，停流光度法	—		—	催化剂	43
Co(Ⅱ)	2,2'-联吡啶-亚铁氰化钾	—	420		地矿	44
	H_2O_2-对氨基二乙基苯胺硫酸盐	—	508	(0～0.16)μg/50ml	矿石	45
	H_2O_2-溴酚红	—	570	(0～4)μg/25ml	高纯氧化镍	46
	H_2O_2-二苯胺磺酸钠	流水冷却	400	(0.05～1.5)ng·ml⁻¹ Co	人发，VB_{12}	47
	O_2-二苯偶氮酰肼(褪色)	—		2×10⁻¹²g·ml⁻¹ Co	中药	48
	H_2O_2-邻苯三酚红-(F^-)	—		—	粮食环境试样	49
	H_2O_2-邻苯三酚红(褪色)	—		(1×10⁻¹¹～2.4×10⁻¹⁰)g·ml⁻¹ Co		50
	H_2O_2氧化胭脂红酸褪色(pH9.8，80℃热10min)	—	540	(0～0.5)μg/25ml	VB_{12}，茶叶	51
	H_2O_2氧化对氨基苯磺酸显色(pH10.1)	—	320	(5×10⁻⁴～0.7)μg/25ml	水	52
	H_2O_2氧化茜素红褪色(NH_3水)	—		(0～0.1)μg/25ml	中药，粮食	53
	KIO_4氧化茜素红褪色(100℃热15min)	—		(0.1～0.7)μg/25ml	水，$NiSO_4$	54
	草酸铁钾 $\xrightarrow[pH2]{光解}$ Fe(Ⅱ)(用phen检测)(250W钨灯照3min)	—	510	(0.2～2.8)mg·L⁻¹	VB_{12}	55
	Cr(Ⅵ) KI-phen	—			水	56
	H_2O_2-PV	—		—	人发	57
	H_2O_2-PR	—		—	B12，镍盐	58
	H_2O_2-苯基荧光酮	—		—	血清	59
	H_2O_2-XO	—		—	人发	60
	H_2O_2-硝基苯基荧光酮	—		—	组织，水	61
	H_2O_2-氯磺酚	—		—	水	62
	H_2O_2-溴苯基荧光酮			—	VB12	63
Cr(Ⅵ)	H_2O_2-甲基红	—	528	(0.1～4.0)μg/25ml	水样	64
	H_2O_2-邻氨基苯酚	—	430	(0.17～17)ng·ml⁻¹	水样	65
	H_2O_2-酚藏花红(褪色)	—	525	(0～5)μg/25ml Cr	钢	66
	H_2O_2-α-萘胺	流水冷却	490	—	水	67
	H_2O_2氧化溴酚蓝，褪色，(微酸性，100℃热10min)	流水冷却		(4～12)μg/25ml	水	68
	H_2O_2氧化酚藏花红，褪色(pH4，100℃热10min)	流水冷却		(0～5)μg/25ml	水	69
	H_2O_2氧化溴邻苯三酚红，褪色(微酸性，100℃热2min)	流水冷却	560	(0.1～0.6)μg/25ml Cr	电镀废液	70
	H_2O_2氧化刚果红，褪色(pH4，100℃热26min)	流水冷却	500	(0.5～3.0)μg/25ml	电镀废水	71
	Cr(Ⅵ)-I⁻-Fe(Ⅱ)-SCN⁻显色，(pH2～2.2)	—	460	(0.5～3.6)μg·ml⁻¹	电镀废液	72

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
Cr(Ⅵ)	$H_2C_2O_4$-甲基红，光照褪色(pH1.2)	—	520	(0.1～1.4)μg·ml^{-1}	水，土	73
	H_2O_2-亮绿 SF	—		—	废液	74
	H_2O_2-中性红	—		—	水	75
	H_2O_2-酸性品红	—		—	废水	76
	H_2O_2-苯酚红			—	水	77,78
	H_2O_2-铬蓝黑 R	—		—	水	79
	H_2O_2-对氨基苯磺酸-α-萘胺	—	520	(0.001～0.1)μg/10ml	高纯试剂	80
	O_2-邻苯二胺-硝酸	—	480	(0.01～0.1)μg/10ml	黑云母、方铅矿	81
	H_2O_2-邻苯二酚-卤素(F、Cl、Br)	—	480	(0～10)μg/25ml	水样	82
	$KClO_3$-苯肼-H 酸	—	527	(0.01～0.1)μg/25ml	标准 NaCl 试剂	83
	H_2O_2-苯二酚-NH_4F	—		(1～8)ng·ml^{-1}	植物、土壤、水样	84
	试铁灵-$(NH_4)_2S_2O_8$	—	375	(0.01～0.1)μg·ml^{-1}	水样、污泥	85
	O_2-还原型酚酞-OH^-	—	550	(0～13)μg/25ml	矿石	86
	巯基乙酸-氯代磺酚 C	—	602	(0～1.2)μg/50ml	铅锌矿	87
	H_2O_2-对苯二酚	—	485	(0～0.8)μg/15ml	工业废水、土壤	88
Cu(Ⅱ)	H_2O_2-次甲基蓝(褪色)	冰水冷却	660	(0～0.7)μg/25ml Cu	人发，指甲	89
	H_2O_2-溴甲酚绿(褪色)	流水冷却	615	(5～100)ng/25ml Cu	地下水	90
	H_2O_2-茜素红(褪色)	流水冷却	500	(0～1.0)μg/25ml Cu	中药	91
	H_2O_2-还原型酚酞-NaF	EDTA	555	(0～300)ng·ml^{-1} Cu	水，尿	92
	H_2O_2-溴酚红(褪色)	流水冷却	595	(0～18.84)μmol·L^{-1} Cu	血清	93
	H_2O_2-溴酚蓝褪色(氨性液)	—	590	(0.2～1.0)μg/26ml	人发	94
	H_2O_2-曙红，(褪色，pH=9.0～9.5，90℃热 8min)	流水冷却	515	(0.2～20)μg·ml^{-1}	水，铝合金，NaCl	95
	H_2O_2-荧光桃红(褪色，氨性液，100℃热 3min)	—		(0.2～1.0)μg/26ml	人发，指甲	96
	H_2O_2-百里酚蓝(褪色，pH11.4，80℃热 10min)	—	600	(0～8)ng·ml^{-1}	铁矿，铝合金，水	97
	H_2O_2-溴酚红(褪色，氨性液，100℃热 14min)	流水冷却	433	(0.10～0.50)μg/25ml	油品，催化剂	98
	H_2O_2-偶氮氯膦 Ⅰ(褪色，稀 H_2SO_4，α,α-联吡啶)	—	505	(0～0.1)μg/25ml	纯锌	99
	H_2O_2-邻苯二酚紫(褪色，氨性介质，90℃热 9min)	—	590	(0～40)ng/25ml	乙醇，氯仿	100
	H_2O_2-甲基橙(褪色，H_2SO_4介质，100℃热 11min)	—		(0～2.0)μg/50ml	豆类，茶叶	101
	H_2O_2-溴甲酚紫(褪色，稀氨水)	—		(0～25)ng/25ml	水，生物样	102
	H_2O_2-KIO_3-中性(褪色，稀 H_2SO_4，90℃热 10min)	流水冷却	540	(0～2.0)μg/25ml	稀土氧化物	103
	空气氧化二苯卡巴肼，显色，(pH9.0)	—	490	(0.8～4.0)ng·ml^{-1}	铝合金，银	104,105
	$KClO_3$ 氧化苯肼成偶氮离子，再与变色酸偶合	流水冷却	505	(0～0.5)μg	粮食	106
	抗坏血酸还原 DBC-偶氮胂，褪色，弱酸性	—		(0～0.8)μg/25ml	铁矿	107
	Cu(Ⅱ)-*meso*-四(4-甲氧基-3-磺酸基苯)卟啉，显色		416	(44～220)ng/11.25ml	—	108
	H_2O_2-酸性品红	—		—	水 —	109、110
	KIO_3-酸性品红-联吡啶	—		—	水，人发	111
	联吡啶-VC-三溴偶氮胂	—		—	食品	112
	空气-苯碳酰肼	—		—	水	113
	H_2O_2-α-萘胺	—		—	试剂，水	114
	H_2O_2-溴甲酚绿	—		—	水，人发等	115
	H_2O_2-绿酚红	—		—	人发、指甲等	116
	VC-DCFA	—		—	桃叶	117

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
Cu(Ⅱ)	$(NH_4)_2S_2O_8$-氨基黑 10B-phen	—		—	水，合金等	118
	H_2O_2-酸性黑 10B	—		—	矿，合金	119
	H_2O_2-CAS	—		—	环境样，水	120
	Mo(Ⅵ)-ClO_3^--KI-淀粉	—		—		121
	H_2O_2-NaCl-还原型酚酞	—		—	水	122
	双硫腙-phen	—		—	矿，土壤等	123
	H_2O_2-还原型罗丹明 B	—		—	水，试剂	124
	H_2O_2-次甲基绿	—		—	水，合金等	125
	$K_2S_2O_8$-甲基红	—		—	水，试剂	126
	磷钼酸-KI	—		—	合金，La_2O_3	127
	H_2O_2-亮黄	—		—	水	128
	二苯脂肼-空气	—		—	水	129
	H_2O_2-BPR-phen	—		—	水	130
	H_2O_2-甲基橙	—		—	水	131
CN^-	Ni^{2+}催化 MnO_4^- 分解，Ni^{2+}-CN^-起二次催化作用	—		(0～6.0)μg・ml^{-1}	电镀废液	132
Eu(Ⅲ)	Cr(Ⅵ)-KI，流动注射	—		—	材料	133
F^-	Fe(Ⅲ)-H_2O_2-罗丹明 B	—		—	水	134
Fe(Ⅲ)	O_2-苯胺蓝	—	598	(0～0.2)μg/10ml	氯化铷、去离子水	135
	H_2O_2-二苯胺磺酸钠	—	550	(0.1～2.0)μg/25ml	饮用水	136
	H_2O_2-没食子酸	—	440	(0～2)μg/25ml	矿样	137
	H_2O_2-偶氮肿 I(α,A 崧-联吡啶作活化剂)	—	500	(0～0.10)μg/25ml	稀土氧化物	138
	过硫酸钾-酸性靛蓝	—	580	(0～3.5)μg/40ml	食品	139
	H_2O_2-钙试剂羧酸钠盐	—	520	(0～500)ng/25ml	饮用水，人发	140
	H_2O_2-还原型罗丹明 B-KSCN	EDTA	560	(0～1.5)μg/25ml Fe	水	141
	H_2O_2-麝香草酚蓝（褪色）-(2,2-联吡啶)	流水冷却	550	(0～80)ng/25ml Fe	水，化学试剂	142
	H_2O_2-对氨基苯磺-邻氨基酚对磺酸	乙酰丙酮及水冷却	430	(0～300)ng/10ml Fe	水，化学试剂	143
	H_2O_2-酚藏花红（褪色）	—	525	(0～0.7)μg/25ml Fe	水，化学试剂	144
	H_2O_2-刚果红（褪色）-(phen)	—	490	(0～0.6)μg/25ml Fe	水，头发，指甲	145
	H_2O_2-二甲基黄（褪色）	流水冷却	515	(0～0.7)μg/25ml Fe	水，头发，指甲	146
	H_2O_2-中性红（褪色）	流水冷却	535	(0～0.7)μg/25ml Fe	面粉，大米	147
	Mo(Ⅵ)-硫酸肼-亚甲蓝（褪色）(Fe(Ⅲ)起阻抑效应)	—	654	(0.2～2)μg/26ml Fe	—	148
	H_2O_2-次甲基蓝（褪色）(phen)	六亚甲基四胺	668	(0～300)ng/25ml Fe	水，HCl	149
	Fe(Ⅲ)-邻菲罗啉-柠檬酸钠，光化学还原显色，pH=5～6	—	510	(0～500)μg/100ml	硅酸盐	150～152
	H_2O_2-酸性铬蓝 K（褪色，pH9.7，95℃）	—	560	(0～1.00)μg/25ml	化学试剂	153
	H_2O_2-百里香酚蓝（褪色，弱酸性，372.7K 热 10min）	—	430	(0～1.4)μg/25ml	人发，水	154
	H_2O_2-溴酚蓝（褪色，稀 HCl，α,α-联吡啶，100℃热 10min）	—		(0.02～0.14)μg/25ml	水	155
	H_2O_2-次甲基蓝（褪色，H_2SO_4 介质，邻菲罗啉）	—			油品，催化剂	156
	H_2O_2-邻苯二酚紫（褪色，氨水介质，85℃热 9min）	流水冷却	590	(0～0.05)μg/25ml	人发	157
	$KBrO_3$-偶氮胂Ⅲ（褪色，稀 H_2SO_4，90℃热 12min）	—	520	(0～14)ng/25ml	纯锌，活性炭	158
	$KBrO_3$-依文思蓝（褪色，乙酸中，90℃热 8min）	流水冷却	620	(0～200)ng/25ml	水，人发，石英岩	159
	KIO_4-中性红（褪色，稀 H_2SO_4，85℃热 8min）	流水冷却	530	(0～0.2)μg/25ml	人发	160

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
Fe(Ⅲ)	Cr(Ⅵ)-KI-淀粉	—	—	—	合金	161
	H_2O_2-BPR	—	—	—	合金	162
	H_2O_2-金莲橙 OD	—	—		人发，水	163
	联吡啶-H_2O_2-甲基红	—	—		水	164
	H_2O_2-次甲基绿	—	—	—	人发等	165
	H_2O_2-XO	—	—	—	组织	166
	H_2O_2-次甲基绿-phen	—			水，合金	167
	H_2O_2-天青 A	—	—	—	人发，水	168
	H_2O_2-对二甲氨基苯胺	—	—	—	水，试剂等	169
	二甲基黄-草酸-光照					170
	Cr(Ⅵ)-KI-淀粉	—			黄瓜	171
	(VO^{2-})	—	—	—	水	172
	H_2O_2-酸性靛蓝-EDTA	—	—	—		173
	H_2O_2-铬黑 T	—	—	—	—	174
	Cr(Ⅵ)-I^-，流动注射	—	—	—	水	175
	Cr(Ⅵ)-KI[Ti(Ⅲ)]	—	—	—	连测	176
	Cr(Ⅵ)-KI[Ti(Ⅲ),V(Ⅳ)]	—	—	—	连测	177
	Cr(Ⅵ)-KI[Sb(Ⅲ)]	—	—	—	连测	178
	MoO_4^{2-}-罗丹明 B	—	—	—	水	179
	$KBrO_3$-三溴偶氮胂	—	—	—	水	180
Hg(Ⅱ)	碘对（$KClO_3$-盐酸苯肼-H酸）显色反应有催化作用，而Hg(Ⅱ)对此体系有阻抑作用，利用此阻抑作用测汞	—	527	(0.08～1.0)μg/25ml	水	181
	亚铁氰化钾-硫脲	—	530	(0～0.06)μg/10ml	自来水、污水	182
	$K_4[Fe(CN)_6]$-phen	—	—	—	水	183
H_2O_2	隐性结晶紫-Fe-$TPPS_4$	—	—	—	血清	184
	硫氰化铁-亚硝酸盐	—	430	(0～0.2)μg/8ml	土壤	185
		—	450	(0～1.0)μg/10ml	化探样品	186
I^-	Fe(Ⅲ)-KSCN(褪色)	固定液	470	(0～80)ng/25ml I^-	尿	187
	NO_2^--$Fe(SCN)_3$(褪色)	—		(0～2.8)μg/8ml I^-	饲料	188
	Ce(Ⅳ)-AsO_3^{3-}	番木鳖碱	446	(0～4)μg/4ml I^-	雨水	189
	$NaNO_2$-$Fe(SCN)_3$(褪色)	—	—	(1～100)mg/100ml	高碘蛋	190
	NO_2^--Fe(Ⅲ)-SCN^-(显色)	—	430	—		191 192
	硫酸铈催化比色测碘仪	—	—	—	—	193
	H_2O_2-铬蓝黑 R	—	—	—	化探	194
	氰酸 T-甲基红	—	—	—	食品	195
Ir(Ⅳ)	KIO_4-对乙酰基偶氮羧	—	—		催化剂	196 197
	KIO_4-罗丹明 B	—	—	—	合成样	198
Mn	1,5-二(乙-羟基-5氯基苯)-3-氰基甲臜-氨水	—	570	$(1.0\times10^{-8}\sim3.0\times10^{-7})mol\cdot L^{-1}$	天然水	199
	孔雀绿-高碘酸	—	—	10ng/25ml	岩石、矿样	200
	高锰酸钾-溴酚蓝-邻菲罗啉(活化剂)	—	578	(0～0.6)μg/15ml	茶叶、铝合金	201
	高碘酸钾-二甲苯兰 FF-邻菲罗啉(活化剂)	—	618	$(1.85\sim11)ng\cdot ml^{-1}$	某些食品	202
	高碘酸钾-孔雀绿-氨三乙酸(活化剂)	—	615	$(0.4\sim5)\mu g\cdot L^{-1}$	饮用泉水	203
	H_2O_2-邻苯三酚红-α,α′-联吡啶(活化剂)	—	540	(0～0.08)μg/25ml	水	204
	孔雀绿-高碘酸钾	—	615	(0～100)ng/25ml	矿泉水 饮用水	205
	KIO_4-孔雀绿(褪色)(phen)	六偏磷酸钠	620	$(0.4\sim20)ng\cdot ml^{-1}$ Mn	雨水，酒，铝箔	206
	KIO_4-孔雀绿(褪色)(氨三乙酸)	流水冷却	584	(0～12)ng/25ml Mn	水	207
	KIO_4-结晶紫(褪色)	流水冷却	590	(0～500)ng/25ml Mn	茶叶，水	208
	KIO_4-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-对硝基苯肼(Mn 有抑制作用)	流水冷却	490	(4～240)ng/25ml Mn	食品	209
	H_2O_2-铬蓝黑 R(褪色)	流水冷却	650	(0～40)ng/25ml Mn	化学试剂	210

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
Mn	H_2O_2-钙红（褪色）	流水冷却	630	—	—	211
	H_2O_2-酸性铬蓝K（褪色）	流水冷却	575	(0～50)ng/25ml Mn	硅酸盐矿物	212
Mn(Ⅱ)	KIO_4-亮绿（褪色，弱碱性）	—	—	—	婴儿食品	213
	KIO_4-酸性铬蓝K（褪色，碱性介质）	—	560	(0.05～5)ng·ml⁻¹	人发，粮食，水	214
	KIO_4-中性红（褪色，pH5.0，氨三乙酸，90℃热10min）	—	521	(0～10)ng·ml⁻¹	铝合金，环境试样	215
	KIO_4-盐基品红（褪色，pH4.1，氨三乙酸）	加KSCN	545	(0.2～20)ng·ml⁻¹	铝合金，废水	216
	KIO_4-罗丹明B（褪色，pH3.57，氨三乙酸）	—	560	(8～240)ng/25ml	矿样，草莓	217 218
	KIO_4-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸（pH＝4.5～5.0，CCl_4萃取反应产物，显红色）	—	520	(0.0025～2)μg·ml⁻¹	茶叶	219
	KIO_4-次甲基绿（褪色）	—	650	(0～40)ng/25ml	地下水	220
	KIO_4-二甲基黄（褪色，pH5.15，80℃）	—	520	(0.192～4.23)ng·ml⁻¹	铝合金，水	221
	KIO_4-硫堇（褪色，pH5.2，氨三乙酸，80℃热11min）	—		(5～80)ng/25ml	水	222
	KIO_4-亚甲基蓝（褪色，pH3.9，80℃热10min）	—	656	(5～80)ng/27ml	水	223
	KIO_4-甲基红（褪色，pH4.2，氨三乙酸，80℃热13min）	—	—	(2～28)μg/25ml	水，谷物	224
	$NaIO_4$-二甲基苯胺（显色，pH7.6）	加HCl，并以水冷却	540	(0.2～8.0)ng·ml⁻¹	海水，指甲，头发	225
	KIO_4-对氨基苯磺酸，（显色，pH5，氨三乙酸）	—	—	(0.4～10)ng·ml⁻¹	海水	226
	KIO_4-耐尔蓝（褪色，pH5.0，氨三乙酸，60℃热15min）	流水冷却	625	(0～40.0)ng/25ml	环境水	227
	KIO_4-甲基绿（褪色，pH4.7，50℃热10min）	加KSCN	630	(4～80)ng/27ml	水	228
	H_2O_2-水杨醛肟（显色，I^-，咪唑啉，pH9.7）	—	404	(0～0.2)mol·L⁻¹	血清	229
	Cr(Ⅵ)-二安替比林乙烯甲烷	—	—	—		230
	KIO_4-结晶紫—氨三乙酸	—	—	—	水，粮食	231 232
	H_2O_2-水杨醛	—	—	—	水	233
	二苯膦肼-VC	—	—	—	粮食	234
	KIO_4-亚甲蓝 氨三乙酸	—	—	—	酒，尿	235 236
	KIO_4-酸性品红	—	—	—	水系沉积物	237
	H_2O_2-水杨醛肟-I^- SDS	—	—	—	尿	238
	H_2O_2-茜素S	—	—	—	水	239 240
	KIO_4-次甲基绿 氨三乙酸	—	—	—	水	241
	KIO_4-甲基紫	—	—	—	水	242
	KIO_4-碱性品红-氨三乙酸	—	—	—	流动注射	243
	KIO_4-NTA-二苯磺酸钠	—	—	—		244
	$(NH_4)_2S_2O_8$-酸性铬蓝K	—	—	—	人参，水	245
	盐酸联胺-酸性品红	—	—	—	粮食	246
Mo(W)	H_2O_2-邻氨基酚	—	415	(2～20)ng·ml⁻¹	污水	247
Mo(Ⅵ)	Fe(Ⅱ)-邻菲罗啉	—	510	(0.05～0.25)μg/25ml	水样	248
	蓝酸肼-天青Ⅰ	—	710	(1×10⁻³～0.9)μg·ml⁻¹	工业废水、温泉水	249
	$KClO_3$-盐酸苯肼-变色酸	—	—	—	粮食	250
	联吡啶-H_2O_2-靛红	—	—	—	粮食	251
	盐酸联氨-橙黄Ⅳ	—	—	—		252
	H_2O_2-噻嗪红R	—	—	—	水	253
$Mo_2O_4^-$	抗坏血酸还原钼酸铵成钼蓝（60℃热34min）	—	760	(0～11)μg/25ml	中药	254
Nb	H_2O_2-邻氨基酚-酒石酸	—	414	(2～14)μg/25ml Nb_2O_5	TiO_2	255

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
NO_2^-	溴酸钾-依来铬青 R	—	490	(0~5)μg/25ml	水	256
	$KBrO_3$-二甲基黄(褪色)	流水冷却	520	(0~12)μg/25ml NO_2^-	水	257
	$KBrO_3$-健那绿(褪色)	流水冷却	630	(0.1~0.8)μg/25ml NO_2^-	水	258
	$KBrO_3$-甲基紫(褪色)	流水冷却	600	(0~12)μg/25ml NO_2^-	水	259
	$KBrO_3$-依来铬青 R(褪色)	流水冷却	490	(0~5)μg/25ml NO_2^-	水	260
	Fe(Ⅱ)+O_2-SCN^-	尿素	470	(0.02~0.5)μg·ml^{-1} $NaNO_2$	水	261
	$KBrO_3$-罗丹明 B(褪色，稀 H_3PO_4，40℃热 7min)	—	564	(0~300)μg/25ml	雨水，唾液	262
	$KBrO_3$-中性红(褪色，稀 H_3PO_4，50℃热 8min)	—	525	(0.2~8)ng·ml^{-1}	水	263
	$KBrO_3$-溴邻苯三酚红(褪色，稀 H_2SO_4，100℃热 35min)	—	520	(0~7)μg/25ml	化学试剂	264
	$KBrO_3$-甲基红(褪色，H_3PO_4介质)	—	525	(0~4)μg/25ml	水，生物试样	265
	NO_2^--甲基橙(褪色)，紫外光照射 10min(pH1.6)	—	505	(0~60)μg/50ml	水，食品	266
	NO_2^--乙醇(0.2mol·L^{-1}柠檬酸)，测量生成的 NO_2 气体对(200~300)nm 紫外光的强烈吸收，定量 NO_2^-	—	—	(0.011~2436)mg·L^{-1}	水	267
	$KBrO_3$-茜素绿	—	—	—	水	268
	$KBrO_3$-孔雀绿	—	—	—	水	269
	$KBrO_3$-碘绿	—	—	—		270
N	CuO-TiO_2-$K_2S_2O_8$	—	—	—	水	271
Ni(Ⅱ)	二苯偶氮酰肼-O_2(褪色)	流水冷却	480	(0~0.3)μg/25.9ml Ni	中药	272
	$K_2S_2O_8$ 茜素紫(褪色)	—	530	—	—	273
Os(Ⅷ)	O_2-γ酸	—		—	阳极泥	274
PO_4^{3-}	Zr(Ⅳ)-甲基百里酚蓝-CTMAB-乳酸四元体系	—	630	(2~400)μg/ml	—	275 276
P(Ⅴ)	α-葡萄糖-钼蓝	—	—	—	铜	277
P(Ⅴ) Si(Ⅳ)	钼蓝速差动力法	—	—	—	钢	278
Pd	次磷酸二氢钠-钼酸铵	—	650		饮用水	279
	Hg(Ⅱ)对次磷酸钠还原磷钼酸→钼蓝	—	—	(0.001~0.01)μg/ml	矿样	280
	O_2-二苯偶氮酰肼(褪色)	流水冷却	480	(0~0.11)μg/25ml Pd	—	281
	葡萄糖氧化酶-过氧化物酶-邻联二茴香胺偶联反应(Pd 激活)	—	500~560	(1~9)μg/10ml Pd	—	282
Pb(Ⅱ)	$K_2S_2O_8$-苏木精(pH7.95)	—	560	(0~0.125)μg/ml	—	283
	$K_2S_2O_8$-儿茶素(显色，pH9.3)	—	440		黄浦江水	284
	$K_2S_2O_8$-3-(3,4-二羟基苯)丙氨酸(pH9.1)	—	480	(0.025~0.125)μg/ml	—	285
	H_2O_2-对硝基偶氮-α-萘酚(二甲基甲酰胺，pH9.8)	—	576	(0.01~0.1)μg/ml	酒	286
	H_2O_2-偶氮胂Ⅰ	—	—	—	人发	287
Pd(Ⅱ)	H_2O_2-罗丹明 B(褪色，pH5.2~5.4)		551	(0~3.6)μg/10ml	催化剂	288
	H_2O_2-桑色素(褪色，70℃热 45min)	流水冷却	401	(0.1~1.0)μg/25ml	—	289
	phen-空气-二苯硫脲	—	—	—	水	290
Pt(Ⅳ)	H_2O_2-二甲苯蓝 FF	—	—	—	催化剂	291
	$KBrO_3$-SDS-偶氮氯膦	—	—	—	矿、阳极泥	292
	KI-5-Br-PADAB	—	—	—	合成样	293
RE	偶氮氯膦Ⅲ-钼(Ⅵ)-亚硫酸钠	—	600	(0~4)μg/25ml La_2O_3	稀土铸铁	294
	偶氮氯膦Ⅲ-铜-亚硫酸钠	—	630	—	铜合金	295
	RE 的三绿偶氮胂络合物与 CyDTA 取代反应	—	630	—	Gd,Y 二元混合物单一稀土	296
	α-呋喃甲酰二肟的酸解反应	—	—	(0~10)ng·ml^{-1}	辉钼矿、岩石	297
	H_2O_2-PV	—	—	—		298

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
Rh(Ⅲ)	KIO_4-钍试剂	—	—	—	废料	299
	KIO_4-罗丹明B				一级反应	300
Ru(Ⅲ)	KIO_4-三氯偶氮氯膦	—	—	—	—	301
	KIO_4-对乙酰基偶氮羧	—	—	—	精矿	302
	KIO_4-孔雀绿-VC	—	—	—	氯化渣	303
	$K_2S_2O_8$-氨基黑10B	—	—	—	精矿，渣	304
	$KBrO_3$-溴甲酚绿	—	—	—	矿	305
	KIO_4-对乙酰基偶氮羧-P（褪色，稀H_2SO_4，100℃热2min）	—	530	(0.01～1.5)μg/10ml	贵金属精矿	306
	KIO_4-罗丹明B（褪色，稀HCl，70℃热10min）	—	560	(0.5～10)ng·L^{-1}	铁铂矿	307
Sb	H_2O_2-对苯二胺	—	443	—	丙酮	308
	H_2O_2-甲基红	—	520	(0～4.5)μg/25ml	水样	309
	KIO_4-中性红（褪色，稀H_2SO_4，85℃热15min）	水冷却	530	(0～0.2)μg/25ml	人发	310
Se(Ⅳ)	$KClO_3$-苯肼-H酸	—	527	(0.05～0.8)μg/25ml	人发	311
		—	520	(0～20)ng/10ml	人发	312
	氯酸钾-苯肼-变色酸	—	612	(0.02～0.1)μg·ml^{-1}	人发	313
	$KClO_3$-盐酸苯肼-α-萘胺	流水冷却	536	(0～0.75)μg/25ml Se	水，头发，矿样	314
	H_2O_2-苯肼-α-萘酚（显色，稀HCl，60℃热30min）	流水冷却	400	(1～11)μg·L^{-1}	人参，人参膏	315
	$KClO_3$-苯肼-α-萘酚-Triton X-100(pH1.4)	—	524	(0～0.5)μg/50ml	人发	316
	$KClO_3$-苯肼-间苯二胺（pH=2.05～2.2；80℃热40min）	流水冷却	450	(0.4～32)ng·ml^{-1}	面粉	317
	$KClO_3$-苯肼-盐酸萘乙二胺（磷酸介质；95℃热20min）	流水冷却	545	(0～100)ng/10ml	岩矿	318
	S^{2-}-还原次甲基蓝褪色（5mol·L^{-1} HCl）	—	—	(5～100)ng·ml^{-1}	岩矿	319
	$NaNO_3$-Fe(Ⅱ)-EDTA（显色，pH2.0）	—	390	(0.002～0.04)μg·ml^{-1}	中草药	320
	$KBrO_3$-变色酸-VC	—	—	—	人发，河水	321
	H_2O_2-苯肼-α-萘胺	—	—	—	人参，水	322
	H_2O_2(KIO_4)-中性红	—	—	—	生物样	323
	• Cr(Ⅵ)-KI-淀粉	—	—	—	矿石	324
	$SnCl_2$-Fe(Ⅲ)-酒石酸	—	—	—	水，土壤	325
Sn(Ⅱ)	H_2O_2-KIO_3-中性红（褪色）	流水冷却	540	(0～0.2)μg/25ml Sn	水	326
SCN^-	$KBrO_3$-罗丹明B	—	—	—	尿	327
Si(Ⅳ)	Cr(Ⅲ)-茜素红S	—	—	—	铁矿石	328
Sn(Ⅳ)	Fe(Ⅲ)-H_2O_2-4-氨基-N，N′-二乙基苯磺酸盐反应被抑制	—	—	—	矿石	329
S^{2-}	H_2O_2-酸性靛蓝（褪色）	—	615	(0.4～3.5)μmol/26ml	—	330
SO_4^{2-}	Zr(Ⅳ)-铬天青B-CTMAB（显色，稀HCl）	—	640	(0～20)μg·ml^{-1}	化学试剂	331
Si(Ⅳ)	空气中O_2氧化Fe^{2+}⟶Fe(Ⅲ)（用SCN^-检测）	—	480	(0～10)μg/25ml	井水，河湖水	332
Te(Ⅵ)	弱碱性，结晶紫的褪色反应（0.01mol·L^{-1} NaOH）加HCl	加HCl	591	(0.025～0.6)μg/25ml	水	333
Ti(Ⅳ)	Cr(Ⅳ)-KI-淀粉	—	—		合金	334
Th(Ⅳ)	H_2O_2-邻苯三酚红（褪色）	—	460	(0～0.1)μg/25ml Th	水	335
Th(Ⅰ)	Cr(Ⅵ)-KI-淀粉	—	—		土壤	336
U(Ⅳ)	$Cr_2O_7^{2-}$-I^--淀粉（显色，pH1.5）	—	600	(0～1.7)μg·ml^{-1}	铁矿	337
	磷钼酸-KI	—	—		$Th(NO_3)_4$等	338
V(Ⅴ)	$KBrO_3$-没食子酸	—	420		岩石、铬铁矿	339
	铍试剂Ⅱ-抗坏血酸	—	475	(0.4～200)ng·ml^{-1}	—	340
	1，3-二羟基-4-氨基-9，10-蒽醌-2-磺酸钠-Tween-20	—	556	(6.4～96)ng·ml^{-1}	自来水	341

续表

被测物	指示反应体系（活化剂或助催化剂）	终止反应方法	λ/nm	测定范围	分析对象	文献
V(Ⅴ)	溴酸钾-邻苯二酚紫	—	445	(0~0.12)μg/25ml	人发 食品	342
	$KBrO_3$-邻氨基苯酚	流水冷却	420	(0~60)μg/25ml V	—	343
	$NaBrO_3$-邻苯二酚 对氨基苯磺酸	—	510	(0~15)μg·L^{-1} V	水	344
	$KClO_3$-邻苯二胺 磺基水杨酸	流水冷却	450	(0.02~1.5)ng/ml V	水，土壤	345
	$KBrO_3$-藏花红 O（褪色）		—	(0.005~10)μg/25ml V	水，人发	346
	$KBrO_3$-铬蓝黑 R（褪色）	冷水冷却	530	(0~800)pg/25ml V	水	347
	$KBrO_3$-溴酚蓝（褪色）	冷水冷却	587	(0~0.50)μg/25ml V	水	348
	$KBrO_3$ 钙试剂羧酸钠（褪色）	—	540	(0~5)ng/25ml V	—	349
	$KClO_3$-苯羟乙酸	流水冷却	370	(20~350)μg·L^{-1}V	水，草酸	350
	$(NH_4)_2S_2O_8$-棓酸-(8-羟基喹啉)	—	—	—	肝，生物样	351
	$KBrO_3$-劳氏紫（褪色，稀 H_2SO_4，抗坏血酸，92℃热16min）	流水冷却	600		水，人发，煤	352
	$KBrO_3$-甲基红（褪色，稀 H_2SO_4，抗坏血酸，100℃热10min）	流水冷却	525	(0~25)ng/25ml	水，人发，煤	353
	$KBrO_3$-依文思蓝（褪色，稀 H_2SO_4，抗坏血酸，90℃热16min）	流水冷却	620	—	—	354
	$KBrO_3$-酸性铬蓝 K（褪色，酸性介质，抗坏血酸）	—	—	(0.01~3.0)ng·ml^{-1}	自然水	355
	$KClO_3$-溴邻苯三酚红（褪色，HCl 介质，100℃热 5min）		520	(0~12)ng·ml^{-1}	钢	356
	$KClO_3$-盐酸氯丙嗪（褪色，H_3PO_4 介质，100℃热 10min）	—	—	(0~25)ng·ml^{-1}	—	357
	$KClO_3$-对硝基苯肼-变色酸（显色，酸性介质，100℃热20min）	—	515	(0.0025~0.035)μg/10ml	水，铝合金	358
	$Cr_2O_7^{2-}$-I^--淀粉体系(pH2.1)	—	—	(0~6.6)μg·ml^{-1}	环境试样	359
	$KClO_3$-罗丹明 B 柠檬酸	—	—	—	—	360
	$KClO_3$-酸性铬深蓝	—	—	—	水，食品	361
	Cr(Ⅳ)-KI-淀粉	—	—	—	水	362
	$KClO_3$-二甲苯黄	—	—	—	—	363
	$KClO_3$-变色酸-抗坏血酸	—	—	—	水	364
V(Ⅴ) Sb(Ⅲ)	Cr(Ⅵ)-KI-淀粉	—	—	—	连测	365
F^-	Zr(Ⅳ)-铬天青 B-CTMAB（显色，pH1.8）	—	640	(0~80)ng·ml^{-1}	化学试剂	366
ClO^-	($NaClO+KI$-淀粉+$Na_2S_2O_3+H_2SO_4$)体系，汞灯照射，秒表记时，出现蓝色的时间长短和 ClO^- 含量有关	—	—	—	水	367
ClO_3^-	ClO_3^--磷钼酸-I^--淀粉体系（1.60mol·L^{-1} H_2SO_4，30℃保温 60min）		580	(0.17~6.0)μg·ml^{-1}	KCl，$KHCO_3$	368
CO_3^{2-}	Cr(Ⅲ)-茜素红 S	—	—	—	土壤	369
Zn(Ⅱ)	四(4-磺基苯)卟啉-咪唑	—	—	—	人发，桃叶	370
Cd(Ⅱ)	H_2O_2-偶氮胂Ⅰ	—	—	—	水	371
Ag(Ⅰ)	$K_4[Fe(CN)_6]$-phen	—	—	—	水	372

① phen——邻菲罗啉。

本表参考文献：

1 戴全裕，皮 宇等．环境污染与防治，1990；12(1)：45
2 朱 鸣．冶金分析，1989；9(1)：52
3 刘长增，孙钦昇等．岩矿测试，1989；8(4)：265
4 汪明礼，方小平．理化检验(化)，1990；26(1)：29
5 戴国忠，蒋治良等．分析试验室，1988；7(12)：18
6 郑肇生，程 浙．贵金属，1989；10(4)：47
7 张志琪，顾 敏等．分析化学，1988；16(10)：927
8 郑肇生等．分析化学，1988；16(2)：138
9 戴国忠，蒋治良．高等学校化学学报，1987；8(8)：703

10 戴国忠，蒋治良．冶金分析，1987；7(2)：16
11 戴立新．理化检验(化)，1987；23(1)：34
12 赵宇炯，田宝籍．分析试验室，1988；7(4)：20
13 郑肇生，林艳平．贵金属，1987；8(3)：38
14 蒋治良，梁爱惠．环境科学，1987；8(3)：72
15 马自战，方志美．分析试验室，1986；5(10)：14
16 吴晓静，夏旭林．合肥工业大学学报（自），14(2)：95
17 吴和舟，郑肇生等．贵金属，1991；12(4)：58
18 郑肇生，凌 琳．高等学校化学学报．1991；12(4)：162
19 朱化雨等．分析试验室，1992；11(4)：31
20 李祖碧，徐其亨．分析化学，1992；21(11)：1254
21 方国春等．武汉大学学报(自)，1992；(4)：127
22 郭传英等．理化检验(化)，1993；29(1)：35
23 程 浙．山西化工．1992；(3)：44
24 赵尔燕，邱林友．上海金属(有色)，1993;14(5):34
25 张志琪等．高等学校化学学报，1994；15(4)：512
26 张肇宏，甘尉棠等．分析化学，1984；12(5)：433
27 向一毅，徐锦苹．理化检验(化)，1985;21(6):322
28 邓维群，肖毓铨等．岩矿测试．1990；9(1)：29
29 王国忠，房桂田等．冶金分析．1989；9(3)：44
30 黄湘源，许逸敏等．分析化学．1989；17(10)：925
31 陈金妹．铀矿地质．1990；6(5)：307
32 梁永庆．地质实验室，1992；8(1)：28
33 梁果文，黄启荣．黄金，1991；12(7)：59
34 张秀英，樊 静．地质实验室，1991；7(2)：69
35 胡洁雪等．黄金．1993；14(7)：49
36 董利生，胡云梯．分析化学，1984；12(2)：118
37 张振辉，刘锦红．江西大学学报(自)，1989;13(3):31
38 佟剑秋．地质实验室，1989；5(3)：165
39 郑肇生等．分析化学，1992；20(8)：954
40 张贵珠等．分析试验室，1993；12(2)：4
41 张贵珠等．分析试验室，1994；13(2)：6
42 许金钩，黄贤智等．分析化学，1989；17(2)：146
43 王建华等．稀有金属材料与工程，1993；22(3)：53
44 吴淑琪，陈四箴．分析化学，1984；12(11)：989
45 张振辉等．分析试验室，1987；6(7)：34
46 陈国树，张志忠．分析试验室，1988；7(4)：12
47 蒋治良，罗培恩．广西化工，1989；(2)：51
48 陈国树，晏细元等．高等学校化学学报，1989；10(2)：200
49 章旭坤，冯艳红．分析测试通报，1989；8(1)：9
50 黄湘源，阮大文等．江西大学学报(自)，1988；12(3)：103
51 张振辉，张政兰．分析化学，1990；18(10)：929
52 吕小虎，陆明刚．化学世界，1992；33(4)：170
53 王歌云．理化检验(化)，1991；27(6)：375
54 曹永林，陈恕华．扬州师院学报(自)，1991;11(1):42
55 陈进生，张春煦等．南开大学学报(自)，1991;(4):10
56 王建华等．分析化学，1992；20(8)：983
57 陈国树等．分析测试通报，1992；11(4)：51
58 肖新亮．刘向阳．化学工业与工程，1992；9(4)：42
59 李清禄等．分析化学，1992；20(11)：1330
60 陈国树等．环境与开发，1992；7(4)：172
61 任 玲等．上海环境科学，1993；12(12)：40
62 邱澄铨等．分析科学学报，1993；9(3)：62
63 方国春等．分析化学，1994；22(5)：533
64 陈国树．分析试验室，1984；3(3)：4
65 汪树玉，吴则才．分析化学．1988；16(3)：251
66 曹永林，陈恕华．冶金分析，1989；9(5)：19
67 李东辉．理化检验(化)，1989；25(4)：221
68 李小华，陈恕华等．环境保护科学，1990；(4)：54
69 曹永林．分析试验室，1991；10(1)：22
70 曹永林，陈恕华．痕量分析，1990(34)：57
71 曹永林．电镀与精饰，1991；10(3)：39
72 王建华，何荣桓等．理化检验(化)，1991；27(4)：215
73 刘七斌，门瑞芝等．冶金分析，1991；11(3)：20
74 曹永林．江苏化工，1992；(2)：42
75 刘长久，姜聚杰．理化检验(化)，1993；29(4)：230
76 吴和舟等．分析化学，1992；20(12)：1445
77 陈恕华，曹永林．环境污染与防治，1993;15(1):42
78 曹永林，陈恕华．理化检验(化)，1994；30(3)：177
79 刘长久，张 文．分析试验室，1994；13(2)：48
80 陈恩钦等．高等学校化学学报，1983；4(2)：260
81 马志诚，杨书宏．分析试验室，1983；2(5)：23
82 慈云祥等．北京大学学报(自)，1983；(6)：57
83 陈恩钦等．江西大学学报(自)，1983；7(2)：83
84 河不来提，童爱军．分析化学，1985；13(4)：301
85 戴树良等．分析化学，1986；14(11)：835
86 梁爱惠，蒋治良．分析化学，1987；15(8)：723
87 肖兆宫．刘成汉．冶金分析．1986；6(4)：6
88 王献科．冶金分析，1988；8(3)：48
89 陈恕华，曹永林．分析化学，1990；18(5)：479
90 汤水强．痕量分析，论丛，1990；(1—2)：102
91 陈国树，李子先等．江西大学学报(自)，1989;13(3):41
92 蒋治良，梁爱惠等．分析化学，1989；17(5)：447
93 汪洪亮，吴从山．上海医学检验杂志，1989；4(1)：29
94 曹永林，李小华，陈恕华．理化检验(化)，1991；27(3)：180
95 高甲友，姚 岚．理化检验(化)，1991；27(1)：48
96 陈恕华，曹永林，李小华．苏州大学学报(自)，1991；7(1)：70
97 孙登明，高 琼，蔡 峰等．岩矿测试，1991；10(2)：120
98 刘立行，沈秋美等．石油化工，1991；20(10)：699
99 赵书林，张 乔，于振安．痕量分析，1991;7(2):66
100 陈国树，傅祖堂，阮长水，江西科学，1991；9(3)：144
101 赖兴华，陈奕浪．分析化学，1992；20(2)：169
102 陈运生，殷秀云，曾言勤．分析化学，1992；20(4)：494
103 陈国树，张 涵，李子先．江西科学，1990;8(1):49
104 蒋治良，毋 马．冶金分析，1991；11(2)：53
105 蒋治良，毋 马．贵金属，1991；12(1)：48
106 张振中，李开密等．分析化学，1992；20(5)：617
107 陈瑞堂，张升辉，王志铿．冶金分析，1992；12(1)：51
108 陶宗祥，季 涛，刘淑兰．化学试剂，1990；12(5)：272
109 孙国英．理化检验(化)，1992；28(6)：358
110 孙国英．食品与发酵工业，1993；(3)：51
111 孙国英．分析试验室，1992；11(4)：44
112 邱澄铨等．分析化学，1993；21(9)：1078
113 黄远忠等．分析试验室，1992；11(2)：38
114 韩 森等．汉中师院学报(自)，1993；(1)：60
115 陈运生等．中国环境监测，1992；8(2)：55
116 周 原，江海萍．分析化学，1992；20(10)：1228
117 蔡汝秀等．痕量分析，1993；9(1.2)：65
118 曾言勤等．岩矿测试，1992；11(3)：284
119 肖新亮等．化学工业与工程，1993；10(3)：13
120 董存智等．分析试验室，1992；11(5)：46
121 王建华等．理化检验(化)，1992；28(5)：277
122 周文林．化学世界，1993；34(1)：27
123 孙登明．地质实验室，1992；8(6)：337

124 黄远忠. 理化检验(化), 1992; 28(6): 343
125 孙登明等. 痕量分析, 1992; 8(3,4): 50
126 万全玉等. 分析化学, 1993; 21(2): 215
127 王建华等. 铀矿冶, 1993; 12(1): 51
128 张文德. 孙仕萍. 分析试验室, 1994; 13(3): 49
129 陈 强. 理化检验(化), 1994; 30(2): 103
130 孙登明等. 地质实验室, 1993; 9(6): 332
131 黄典文等. 广东工学院学报(自), 1993; 10(4): 91
132 王建华, 何荣桓. 电镀与环保, 1992; 12(2): 29
133 王建华等. 烟台师院学报(自), 1993; 9(2): 134
134 何建英等. 河南大学学报(自), 1993; 23(3): 68
135 谢格波等. 分析试验室, 1984; 3(3): 61
136 张明时, 田宝镛. 分析化学, 1982; 10(10): 596
137 邝允峰. 理化检验(化), 1983; 19(6): 46
138 陈国树等. 分析化学, 1988; 16(3): 230
139 蒋治良, 梁爱惠. 化学世界, 1987; 28(3): 115
140 张振辉. 高等学校化学学报, 1988; 9(7): 681
141 戴国忠, 蒋治良, 李昌峰. 分析化学, 1990; 18(1): 39
142 刘长增, 郭士城, 王淑仁. 环境科学, 1989; 8(6): 51
143 许逸敏, 黄湘源等. 化学试剂, 1989; 11(6): 375
144 陈恕华, 曹永林. 江苏化工, 1989; (4): 52
145 曹永林, 陈恕华. 痕量分析, 1989; 5(1): 50
146 陈恕华, 曹永林. 分析试验室, 1989; 8(2): 41
147 曹永林, 陈恕华. 理化检验(化), 1989; 25(1): 45
148 熊少祥, 任吉存等. 化学通报, 1989; (2): 36
149 张志棋, 薛封和, 庞长安. 分析试验室, 1988; 7(10): 12
150 杨本谱. 冶金分析, 1990; 10(4): 53
151 颜 科, 孙德仁等. 理化检验(化), 1990; 26(6): 350
152 刘一新, 吴 斌. 环境污染与防治, 1990; 12(6): 36
153 张振辉, 万全玉. 化学试剂, 1990; 12(6): 335
154 曹永林. 南京师大学报(自), 1991; 14(2): 38
155 蔡淑余, 胡建萍, 李志刚. 广西化工, 1991; (4): 31
156 刘立行, 吴立香, 张丽君. 石油化工, 1991; 20(11): 775
157 陈国树, 阮长水, 傅祖堂. 痕量分析, 1991; 7(1): 45
158 陈显堂, 张升晖, 王宗廷等. 理化检验(化), 1991; 27(5): 290
159 张振辉, 张改兰等. 地质实验室, 1990; 6(6): 319
160 陈国树, 陈 岚, 文 昱. 环境化学, 1990; 12(6): 77
161 王建华等. 冶金分析, 1992; 12(4): 46
162 高 琼等. 淮北煤师院学报(自), 1993; 13(4): 36
163 宋明显等. 分析试验室, 1992; 11(6): 46
164 刘 峥, 谢彤莹. 重庆环境科学, 1993; 15(37): 50
165 段秀云等. 分析试验室, 1992; 11(5): 13
166 陈国树等. 南昌大学学报(理), 1993; 17(2): 52
167 孙登明等. 岩矿测试, 1992; 11(4): 363
168 陈运生等. 岩矿测试, 1992; 11(4): 362
169 刘绍璞等. 西南师大学报(自), 1993; 18(2): 141
170 许逸敏等. 江西大学学报(自), 1993; 17(1): 59
171 李智民, 赵立芳. 分析试验室, 1992; 11(6): 36
172 王建华等. 分析化学, 1993; 21(5): 593
173 邱澄铨, 尹庚明. 痕量分析, 1992; 8(3,4): 70
174 张桂恩等. 河南师大学报(自), 1993; 21(2): 55
175 王建华, 何荣桓. 环境科学, 1993; 14(5): 82
176 王建华等. 湿法冶金, 1993; (4): 58
177 王建华等. 分析化学, 1993; 21(12): 1289
178 王建华, 何荣桓. 化学学报, 1994; 52(1): 71
179 刘绣华等. 分析化学, 1994; 22(5): 535
180 龙文清, 邱澄铨. 理化检验(化), 1994; 30(2): 84
181 黄湘源, 阮大文. 江西大学学报(自), 1982; 6(1): 45
182 刘长增, 王淑仁. 分析化学, 1990; 18(4): 348
183 许逸敏, 阮大文. 江西大学学报(自), 1991; 15(1): 12
184 李 方, 程书麟. 分析化学, 1991; 19(8): 921
185 徐弄琴, 分析测试通报, 1985; 4(3): 31
186 刘 棕, 肖艳玲, 岩矿测试, 1986; 5(3): 193
187 黄余贵, 职业医学, 1990; 17(3): 170
188 杨 林, 钱 沁. 分析测试通报, 1989; 8(5): 15
189 王尊本, 郑朱梓, 龚桂良. 分析化学, 1989; 17(1): 83
190 易 文, 马就庆. 广西冶金, 1992; 21(1): 60
191 陈朗星, 林玉婷, 洪水皆. 干旱环境监测, 1991; 5(1): 27
192 具桂玉, 董巧敏, 张孝英. 岩矿测试, 1991; 10(1): 71
193 张 槟等. 分析化学, 1993; 21(9): 1111
194 刘长久等. 桂林冶金地质学院学报, 1992; 12(4): 438
195 郜洪文. 光谱学与光谱分析, 1993; 13(6): 109
196 刘锡林等. 贵金属, 1992; 13(1): 51
197 寇宗燕, 刘锡林. 冶金分析, 1992; 12(6): 48
198 蒋治良, 戴国忠. 贵金属, 1992; 13(1): 54
199 俞汝勤, 曾鸽鸣. 化学学报, 1983; 41(10): 960
200 邝允峰. 分析测试通报, 1985; 4(1): 51
201 张志琪, 李百禄. 分析化学, 1988; 16(4): 334
202 杨志斌等. 高等学校化学学报, 1988; 9(1): 82
203 王尊本等. 分析化学, 1987; 15(2): 145
204 陈国树. 分析化学, 1987; 15(10): 920
205 赵宏德. 环境化学, 1987; 6(3): 76
206 贾光棡, 邓蕙姑, 沈 清. 安徽大学学报(自), 1989; (1): 67
207 郑肇生, 王耀光, 韩利平. 分析化学, 1989; 17(2): 160
208 陈恕华, 曹永林. 化学世界, 1990; 31(4): 172
209 彭珊珊, 林 萍, 游小杰. 痕量分析, 1990; 论丛(1～2)
210 张振辉. 化学试剂, 1989; 11(1): 4
211 张振辉, 刘锦云, 熊利利. 化学学报, 1989; 47(8): 808
212 张振辉, 张改兰, 岩矿测试, 1989; 8(1): 13
213 姚凤姬, 苏 雁, 慈云祥. 北京大学学报(自), 1990; 26(6): 663
214 刘长增, 郭士城, 王淑仁. 环境化学, 1991; 10(2): 68
215 董存智, 董 彦, 曾言勤. 冶金分析, 1991; 11(2): 9
216 蒋治良, 李长春. 冶金分析, 1991; 11(4): 20
217 章旭坤, 田彤颜. 分析化学, 1991; 19(7): 789
218 蒋治良. 岩矿测试, 1990; 9(3): 189
219 冯启利, 彭珊珊, 温德云. 江西大学学报(自), 1991; 15(3): 95
220 陈运生, 段秀云. 干旱环境监测, 1991; 5(3): 168
221 孙登明, 高 琼, 古 玲. 理化检验(化), 1991; 27(6): 374
222 郑肇生, 吴和舟, 林葛红. 分析化学, 1991; 19(12): 1418
223 熊少祥, 方家权, 任吉存. 环境化学, 1992; 11(1):

45
224 郑肇生，白志盛，胡治远. 环境化学，1992；11(1)：39
225 段友构，王尊本. 厦门大学学报（自），1991；30(6)：629
226 王尊本，郑朱梓，董清木. 厦门大学学报（自），1991；30(3)：336
227 曾言勤，陈立国，陈运生等. 上海环境科学，1991；10(9)：28
228 熊少祥. 地质实验室，1992；8(2)：69
229 曾文青. 监床检验杂志，1991：9(2)：73
230 朱化雨等. 分析试验室，1993：12(5)：53
231 段秀云等. 北方环境，1992；(2)：21
232 章旭坤，何拥军. 化学试剂，1992；14(3)：173
233 张振宇等. 冶金分析，1993；13(3)：42
234 孙国英. 理化检验（化），1993；23(3)：180
235 徐泽民. 理化检验（化），1992；28(5)：305
236 陈亚华，韩秀丽. 冶金分析，1993；13(4)：22
237 孙国英. 地质实验室，1993；9(2)：72
238 曾文青. 分析化学，1993；21(1)：40
239 刘长增等. 分析化学，1993；21(7)：866
240 张相育等. 北方环境，1993；(2)：27
241 陈运生等. 中国环境监测，1993；9(1)：39
242 周华方等. 化学通报，1994；(4)：42
243 曾言勤等. 理化检验（化），1944；30(2)：86
244 万小芬，许逸敏. 分析试验室，1994；13(2)：50
245 金尚满等. 冶金分析，1994；14(2)：17
246 郑肇生等. 分析化学，1993；21(11)：1344
247 慈云祥等. 北京大学学报（自），1984；(5)：52
248 李鸿业. 分析化学，1986；14(11)：846
249 郑肇生等. 分析化学，1988；16(3)：260
250 彭珊珊等. 分析试验室，1994；13(2)：44
251 尹庚明等. 分析试验室，1994；13(2)：46
252 郑肇生等. 高等学校化学学报，1994；15(1)：23
253 张文德. 分析化学，1994；22(4)：373
254 陈国树，万承波，程秋平. 江西科学，1990；8(4)：34
255 慈云祥等. 化学试剂，1983；5(5)：257
256 张振辉，张改兰. 岩矿测试，1988；7(3)：181
257 张振辉，张改兰. 痕量分析，1989；5(1)：26
258 张振辉. 分析化学，1989；17(2)：122
259 张振辉，张改兰. 地质实验室，1988；4(6)：341
260 张振辉，张改兰. 岩矿测试，1988；7(3)：180
261 袁君姆，田秋霖，蔡晓华. 分析化学，1988；16(9)：788
262 张振辉，饶 辉，郭玉华等. 江西大学学报（自），1991；15(4)：45
263 郑肇生，吴和舟，赵文忠. 高等学校化学学报，1991；12(11)：1457
264 曹永林. 江苏化工，1991；(1)：58
265 张改兰，张振辉. 分析试验室，1990；9(6)：24
266 门瑞芝，刘士斌，马晓梅. 分析化学，1992；20(4)：455
267 臧平安. 分析化学，1991；19(12)：1363
268 郑肇生等. 分析化学，1993；21(6)：669
269 李贵荣. 理化检验（化），1994；30(3)：164
270 段秀云. 北方环境，1993；(4)：30
271 杨树南等. 化工环保，1993；13(3)：164
272 陈国树，聂小弟，晏细元. 分析化学，1989；17(6)：548
273 顾志澄，张羽蓓. 环境化学，1990；9(2)：58
274 周志法等. 高等学校化学学报，1993；14(6)：781
275 刘绣华，刘海澜. 河南大学学报（自），1990；20(3)：57
276 刘海澜，刘绣华. 分析试验室，1990；9(6)：19
277 刘 艳. 辽宁师大学报（自），1993；16(4)：295
278 屈凌波等. 郑州大学学报（自），1993；25(3)：55
279 田英炎. 分析化学，1982；10(2)：126
280 刘人青，陈四箴. 分析化学，1985；13(4)：241
281 陈国树，晏细元，聂小弟. 冶金分析，1988；8(5)：4
282 叶季官，孙佐宁等. 分析化学，1989；17(1)：49
283 顾志澄，张羽蓓. 同济大学学报，1990；18(3)：389
284 顾志澄，张羽蓓. 分析化学，1991；19(3)：300
285 顾志澄，张羽蓓. 痕量分析，1990；(3,4)：45
286 黄湘源，蔡振时，李建平等. 江西大学学报（自），1991；15(2)：82
287 陈国树等. 分析试验室，1994；13(1)：70
288 李 方，程书麟. 理化检验（化），1991；27(5)：286
289 许逸敏，方晓春，李胜明等. 江西大学学报（自），1990；14(3)：45
290 孙登明. 分析试验室，1994；13(3)：65
291 陈国树等. 分析化学，1993；21(9)：1081
292 寇宗燕等. 分析化学，1993；21(5)：587
293 容庆新等. 贵金属，1993；14(2)：55
294 杨志斌. 分析化学，1984；12(7)：592
295 杨志斌等. 分析化学，1985；13(6)：413
296 陈丹华等. 高等学校化学学报，1985；6(11)：967
297 朱玉伦，李淑玲，邵济馨. 分析化学，1991；19(2)：162
298 陈国树等. 分析试验室，1992；11(2)：40
299 蒋治良等. 贵金属，1993；14(4)：59
300 张志琪等. 分析化学，1994；22(2)：193
301 寇宗燕等. 贵金属，1994；15(1)：58
302 寇宗燕等. 分析试验室，1992；11(4)：48
303 蒋治良等. 贵金属，1992；13(2)：51
304 陈兴国等. 分析化学，1993；21(6)：701
305 杨方龙等. 岩矿测试，1993；12(2)：89
306 刘锡林，寇宗燕等. 分析化学，1992；20(3)：345
307 蒋治良. 化学通报，1992；(1)：38
308 顾树华，倪木春. 理化检验（化），1982；18(4)：34
309 陈国树. 江西大学学报（自），1985；9(3)：74
310 陈国树，陈 岚，文 昱. 分析试验室，1991；10(3)：19
311 陈思钦等. 分析化学，1984；12(10)：913
312 顾 钢等. 分析化学，1988；16(6)：559
313 秦永惠. 理化检验，1986；22(4)：228
314 陈思钦，傅毅华等. 江西大学学报（自），1989；13(3)：36
315 金尚满，车裕全，杨世辉. 吉林师院学报（自），1990；(1)：27
316 罗宗铭，黄文彪. 理化检验（化），1991；27(2)：100
317 姚凤姬，董天祥，慈云祥. 北京大学学报（自），1990；26(6)：659
318 孙成均，余辉菊，杨正文. 理化检验（化），1990；26(5)：302
319 朱 鸣，诸晓音. 地质实验室，1991；7(2)：76
320 张路端，吕九如等. 理化检验（化），1991；27(5)：275
321 李东辉等. 理化检验（化），1992；28(4)：212
322 金尚满等. 冶金分析，1993；13(3)：24
323 陈国树等. 分析试验室，1992；11(4)：10
324 王建华等. 烟台大学学报（自），1993；(2)：21
325 门瑞芝等. 吉林大学学报（自），1993；(4)：89
326 陈国树，张 涵，李子光. 江西大学学报（自），1990；

14(2):64
327 张贵珠等. 分析化学, 1993; 21(8):905
328 王建华,侯荣桓.分析试验室,1992;11(2):43
329 王庆宜, 陈任务. 地质实验室, 1993; 9(2):87
330 王祖蕊, 贺光椆. 安徽大学学报（自）. 1988; (3):71
331 张贵珠,李 敏,史慧明.化学试剂,1990;12(3):139
332 黄湘源,李明德,谭洪涛.分析化学,1992;20(4):419
333 朱丽华, 韦月萍, 施文赵. 分析试验室, 1991; 10(3):17
334 王建华, 何荣桓. 化学世界, 1993; 34(3):125
335 陈国树, 胡银荷, 黄 宁. 分析测试通报, 1988; 7(6):45
336 王建华等. 分析试验室, 1992; 11(5):43
337 王建华, 何荣桓, 王建国. 铀矿冶, 1991; 10(4):35
338 王建华等. 核化学与放射化学, 1993; 15(1):61
339 邝允峰. 分析测试通报, 1983; 2(4):52
340 朱玉伦, 邵济馨. 分析化学, 1987; 15(10):865
341 曹诗倜, 陈建民. 冶金分析, 1988; 8(3):3
342 陈国树等. 分析化学, 1988; 16(2):144
343 陈国树, 程秋平, 万承波. 江西大学学报（自）, 1988; 12(4):33
344 李文杰, 周淑萍. 分析化学, 1989; 17(5):466
345 陈思钦, 曾希建, 傅毅华. 江西大学学报（自）; 1990; 14(1):84
346 薛封和, 张志琪, 陈 骊. 分析化学, 1989; 17 (7):622
347 张改兰, 张振辉. 分析化学, 1988; 16(11):1040
348 张志琪, 薛封和, 姜佩璇. 高等学校化学学报, 1989; 10(3):305
349 张振辉. 江西大学学报（自）, 1988; 12(4):7
350 蒋治良. 广西化工, 1989; (1):43
351 王应瑜, 卢 燕. 痕量分析, 1988; 4(4):45
352 张振辉, 盛望喜, 陈 树. 分析化学, 1991; 19(7):782
353 张振辉, 张改兰. 痕量分析, 1990; (3,4):35
354 张振辉. 岩矿测试, 1991; 10(3):203
355 刘长增, 刘春业等. 分析化学, 1992; 20(4):467
356 高 琼, 孙登明, 石 彬等. 冶金分析, 1992; 12(2):41
357 刘 岩, 吕家麟. 分析化学, 1992; 20(2):205
358 赖晓绮, 徐勉懿. 分析试验室, 1992; 11(1):48
359 王建华, 周全法, 阮文举. 环境科学, 1992; 13(2):80
360 蒋治良. 冶金分析, 1992; 12(5):19
361 张爱梅. 分析化学, 1993; 21 (6):676
362 王建华, 何荣桓. 上海环境科学, 1993; 12(6):22
363 张爱梅等. 分析试验室, 1994; 13(3):44
364 朱化雨等. 分析试验室, 1994; 13(3):38
365 王建华, 何荣桓. 痕量分析, 1993; 9(1,2):61
366 张贵珠, 李 敏, 史慧明. 分析化学, 1990; 18(12):1092
367 门瑞芝, 刘士斌, 邓红波. 吉林冶金, 1991; (5):36
368 王建华, 何荣桓, 王建国. 理化检验（化）, 1991; 27(5):296
369 王建华等. 烟台师范学院学报（自）, 1992; 8(3):34
370 彭学军等. 理化检验（化）, 1992; 28(3):170
371 陈国树等. 分析化学, 1994; 22(6):583
372 刘树深, 高祥祥. 黄金, 1993; 14(2):46

第八节 流动注射吸光光度法

一、流动注射吸光光度法概述

流动注射(FIA)吸光光度法是FIA技术与吸光光度检测技术结合而发展起来的一种新方法. 在此方法中, FIA技术主要作为样品前处理及各种化学操作的手段, 吸光光度法作为检测手段。

流动注射分析是把试样溶液直接以“试样塞”的形式注入到管道的试剂载流中，然后被载流推动进入反应管道。试样塞在向前运动过程中靠对流和扩散作用被分散成一个具有浓度梯度的试样带，试样带与载流中某些组分发生化学反应形成某种可以检测的物质、该方法不要求反应达到稳定状态，可在非平衡的动态条件下进行，从而提高了分析速度[184]。

流动注射吸光光度法的示意见图 14-8。

图 14-8 (a) 所示是最简化的FIA系统。它是由蠕动泵，注射器（进样阀）反应盘管，检测器（由流动池和某些传感器组成）和记录仪构成。

图 14-8 (b) 是典型的FIA输出信号。峰高 h，峰宽 W 或峰面积 A 都与待测物浓度有关。t_r 是化学反应的存留时间，是从注入试样S点到出现峰的最高点所经历的时间，t_r 反映了FIA系统的响应情况。一般在5～20秒的范围内。t_b 为基线处峰宽。

流动注射分析从试样注入FIA系统开始到分析完成，试样、试剂和载流之间经历着一个综合过程，其中，包括有载流、样品和试剂三者扩散和对流的分散混合过程；第二是试剂和试样发生反应过程—化学反应动力学过程，第三是能量转换过程。

在 FIA 分析中，分散混合过程都是以层流为前提条件的，如果形成湍流，试样塞的浓度梯度将被破坏，FIA 中的分散混合过程就很难控制，也就不再有 FIA 的高度重现性。为了描述“试样塞”与载流之间分散混合程度，引入了分散度 D_t 的概念，

$$D_t=\frac{c_0}{c_{max}} \qquad (14\text{-}23)$$

式中，D_t 为样品分散度；c_0 为样品溶液原始浓度；c_{max} 为在体系中与注入样品后所录峰值相当的溶液浓度。如 $D_t=2$，表示样品被载流以 1∶1 稀释。分散度是 FIA 系统的一个重要参数，不同的检测方法要求采用不同分散度的 FIA 系统。分散度可分成三个范围：低分散，$1<D_t<2$；中分散，$2<D_t<10$；高分散，$D_t>10$。流动注射吸光光度法一般用中分散度。FIA 系统的分散度受进行体积、反应管道长度、内径、载流平均流速等因素的影响。分散度的确定，是以获得适当的信号响应和测量频率为依据的。

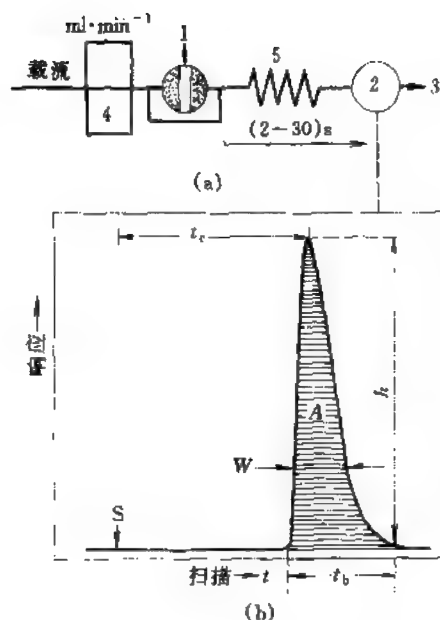


图 14-8 流动注射吸光光度法示意
(a) 以试剂为载流的最简单的单道 FIA 流路；
(b) 典型的 FIA 输出信号
1—注射器（进样阀）；2—检测器；3—记录仪；
4—蠕动泵；5—反应盘管

虽然 FIA 化学反应动力学过程的研究还不十分充分，但有关试样塞在管道中的化学反应、化学反应速率、产物的形成速率与分散度间的关系等问题的研究已有报道，这些 FIA 未来发展的核心问题，目前还落后于应用方面的研究。

流动注射分析中的第三个过程是能量转换过程，在流动注射吸光光度法是利用物质分子选择性吸收光能的特性遵从吸收定律将吸收光能的变化转换成电信号。

在流动注射吸光光度法中，为了得到高度的重现性应注意掌握以下几点：

①样品注射体积要准确，保证注射体积变化小于 1%。

②流速稳定。分析管长度确定后，只要流速不变，就能提供准确再现的反应时间。

③正确地控制样品的分散度。

近年来 FIA-吸光光度法发展迅速，已发展成为应用很广的一种新的分析技术，它与多种其他技术结合，使过去许多不易用于定量分析的化学反应的中间体测定变成现实，拓宽了应用范围。

有关流动注射分析的原理、实验设备与仪器、实验技术等方面的详细介绍可参阅流动注射分析的主要创始人，J. 茹奇卡和 E. H. 汉森教授的著名专著《流动注射分析》。该书第一版于 1981 年出版、第二版于 1988 年出版。第二版的中译本于 1991 年 5 月由北京大学出版社出版，第二版中列出了至 1986 年 4 月底以前的有关流动注射吸光光度法的文献 556 篇。在国内，1977 年方肇伦首先引进和研究了 FIA 技术，并在《分析化学》1981 年第 9 期上作了系统介绍，1983 年 4 月在沈阳召开了国内第一次 FIA 学术交流会。至今 FIA 在国内外都以迅猛的速度向前发展。

二、流动注射吸光光度法应用

表14-13 流动注射吸光光度法应用实例

被测组分	试样	反应体系或试剂	测定λ/nm	进样体积/μl	采样频率/(次·h⁻¹)	测定范围/(μg·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)	RSD/%	备注	文献
Ag	废水	二甲氨基苄基罗丁宁(p-DMABR)	490	25	120	2~20	0.40	—	—	1
	废水	试银灵(p-DMABR)	490	—	90~120		—	<0.9	双光束分光光度法灵敏度较普通FIA提高1倍	2
	定影液废水	Sobba反应体系	670	350	72	0~0.4	5.0	2.5~5.8	催化反应	3
Al	河泥	铬天青S	570	200	100	1~15	—	<3		4
	人发	3,5-二溴水杨基荧光酮-溴化十六烷基三甲铵	560			-	—	<3	停流-动力学分析 30℃	5
	河泥	..			90	0~55	40	—	—	6
As	土壤	氢化物发生 $AgNO_3$-聚乙烯醇-乙醇	430		35	0.1~1.0	—	4.4	吸收[illegible]	7
Au	矿石	硫代米蚩酮 TMK	575	—	60	0.05~0.30		1.5	2cm光程	8
Be	铍青铜	Be-铬菁R-溶胶剂	605	100	--	0.04~2.20	30	<1	—	9
Br	卤水	次氯酸钠-酚红	575	50	—	0.2~2.0	—	—	合并带	10
Co	自来水	二甲酚橙-溴化十六烷基三甲基铵	607		200	0~5	—	—	..	11
Ca+Mg	海水									
	井水		585			0~8				
Ca		偶氮氯膦Ⅰ	658	50	200	0.2~2.0	100		pH12.2	12
Ca+Mg	天然水					0~2.0	20		pH7.0	
Ca+Mg	自来水	偶氮氯膦Ⅰ	575		60×2	Ca 0~[illegible]	—	0.3~0.5	—	13
Mg	米糠叶									
	人尿									
	血清	EGTA-Pb 掩蔽Ca				Mg 0~3				
Ga		TCA 和 PV CPA			90			<5	双光束分光光度同时测定	14
La										
Ca	血清	CTMAB-二甲酚橙	610	30	100	-	—	1.6		15
Ca,Mg(水硬度)	天然水	酸性铬蓝K	467	30	180	(0~5.0)×10⁻⁴mol·L⁻¹		0.6	—	16
Cr		meso-四(4-磺酸苯基)卟啉	452		100	0~3	2.9	0.51	30℃,合并带法	17
	铬铁合金	KC-碳罗丁G体系	370	50			—	2.6	—	18
	电厂水,锅炉水,工业水	铝试剂,溴化十六烷基吡啶	540	90	72	2~100	300		—	19
	陶瓷浸泡液,自来水	meso-四(4-磺酸基苯)卟啉	432	100	100	0~2.5	—	0.55	合并带法,30℃差速动力学分析	20
	废水	Cd^{2+} Cadion2B-Triton X-100	555		340	0~2.5				21
	—	meso-四(4-三甲胺基苯基)卟啉			80	—				22
	水		—	—	—	—	6	-		23

续表

被测组分	试样	反应体系或试剂	波长/nm	进样体积/μL	采样频率/(次·h⁻¹)	测定范围/(μg·mL⁻¹)	检出限/(ng·mL⁻¹)	RSD/%	备注	文献
Cr(Ⅲ) Cr(Ⅵ)	合成试样	DPC-高锰酸钾-抗坏血酸	—	[illegible]	120					24
Cl⁻ 游离氯	饮用水	$Hg(SCN)_2$ 邻联甲苯胺	[illegible]	320	…	—	—	—	可同时测游离氯	25
Cl⁻	水	$Hg(SCN)_2$-$Fe(NO_3)_3$	480	14	250	0~100	—	0.5	集成化微型 FIA 系统	26
	血清	$Hg(SCN)_2$	480	20	100	0~1000	—	1.70	[illegible]	27
	水	[illegible]	436 490	320~ 420	75	—	—			28
	牛奶	$Hg(SCN)_2$	480	70	90	0~2000	—	1.30	微渗析	29
	生活污水	$Hg(SCN)_2$	480	200		0~50	—	0.8	双光束吸光光度法	30
	水样	$Hg(SCN)_2$-Fe^{3+}体系	—	—	90	5~18	—	3.0		31
	水	$Hg(SCN)_2$-Fe^{3+}体系	-		-	0~40		-	[illegible]	32
	生活污水	$Hg(SCN)_2$-Fe^{3+}体系	—	—	80	—	—	—	以梯度法扩大测定范围	33
余氯	发电厂冷却水	—	515		180		20	1.9	在线监测	34
CN⁻	废水	异烟酸-吡唑啉酮	548	8mL	40	0~1.0	6	1.8	气体扩散分离技术	35
	污水	Cu(Ⅱ)-CAS-CTMAB	530	50	60	—		1.26		36
	天然水、废水	吡啶-巴比妥酸	454	40	60	0~4	20	0.6	不稳定中间产物流动反应 FIA	37
	废水	—	—	…	35	0.1~15	—	—	微孔膜气体分离	38,39
			—	—	30			—	气体扩散-FIA	40
CN⁻和SCN⁻	废水	—	—	—	—	CN⁻:0~20 SCN⁻:0~80	—	—	rFIA,切换阀实现测定转换	41
CN⁻	电镀废水	异烟酸-吡唑啉酮	—		—			—		42
Co^{2+}		[illegible]	384	50	—				[illegible]	43
	[illegible]	[illegible]	540	…	120	—	140	2.9	现场检测	44
Co^{2+} Mn^{2+}		meso-[illegible]卟啉	432 406		10	ng·mL⁻¹		0.5 0.5	25℃,停流 60s	45
Cr	—	Cr(Ⅲ)催化 H_2O_2 氧化[illegible]	52[illegible]	50	120	0.02~0.06	0.50	2.7		46
	电镀液	$NH_3·H_2O$-H_2O_2	500	·	—	0~0.55	—			47
	水	Fe(Ⅱ)-邻菲罗啉	510	50	50	1~12		0.6	停流法	48
	[illegible]	5-Cl-PADAB	570	50	120	1.0~5.0	100	2.0	合并带进样	49
Cu,Co		PAR	500	50		0.5~5.0 0.5~3.0			用 pH 梯度技术测定结果优于[illegible]	50
Co Fe	自来水和工业废水	3,5-二溴-PADAP(用于测 Fe)	600	50	…	0.1~3.0 0.1~2.5		3.2 4.2	合并带法,注入 200μL [illegible]	51
[illegible] Cr(Ⅵ)	环境水 合成废水	DPC		100	200 120			2.8 1.6	PbO_2 柱在线氧化	52

续表

被测组分	试样	显色体系或试剂	测定 λ/nm	进样体积/μl	采样频率/(次·h^{-1})	测定范围/(μg·ml^{-1})	检出限/(ng·ml^{-1})	RSD/%	备注	文献
Cr(Ⅵ)和总铬	城市废水	二苯碳酰二肼	543	257	150	0~7.6	—	<1.5		53
Cr(Ⅵ)	钢铁	Cr(Ⅵ)与Fe(Ⅱ)作用，Fe(Ⅲ)邻菲罗啉配合物褪色	510	50	80	0~2.5	10	0.60		54
	电镀废水，污水	二苯碳酰二肼	—		60	0~5.0	50	1.1		55
	钢样	利用对三种显色试剂的氧化褪色反应	—	—	—	0.04~0.72	—	—		56
Cu	—	5-Br-PADAP	562	250	120	0.1~1.5	[illegible]	1.0		57
	镀铜液	[illegible]	700	—	—		—	—	连续监测	58
	铜合金	N,N'-二(2-羟乙基)二硫代氨基甲酸	53[illegible]	150	100	0~12	[illegible]	[illegible]		59

续表

被测组分	试样	反应体系或试剂	测定 λ/nm	进样体积/μl	采样频率/(次·h⁻¹)	测定范围/(μg·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)	RSD/%	备注	文献
CO_2	血液	甲酚红	—	—		0~40 mmol·L⁻¹	—	<2	气体扩散	77
Eu	稀土样品	二甲酚橙	673	100 或 200	90	1~20	—	1.38 1.51	锌柱在线还原	78
	稀土氧化物	二甲酚橙	654	60		3~25 (Sm_2O_3)		1.3	锌粉柱在线还原	79
Fe	水	邻菲罗啉	510		120	0~4	200	1.2		80
	硅酸盐	邻菲罗啉	510	105	120	0~40		0.85		81
	[illegible]	Fe(Ⅱ)-邻菲罗啉-对 Triton X-100	512	50	100	0.5~[illegible]	20	2.0		82
Fe(Ⅱ) Fe(Ⅲ)	—	邻菲罗啉 VC 还原	512	100	180	0~2.5	20	0.5	合流法	83
Fe Ti	矿石	钛铁灵	550 425	120	110	0~85 Fe_2O_3 0~25 TiO_2		0.92 2.97		84
Fe(Ⅲ) V(Ⅴ)	奶粉、葡萄干、桔子	CTA CTA-$KBrO_3$	422	—	—	0.3~60 0.005~1.5	—	—	停流 50s	85
Fe、Mn			—	—	60		—	—	标准加入法	86
Fe(Ⅱ)	雨水、河水等	邻菲罗啉	512	100	250	0~2.5	20	2.80		87
Fe(Ⅲ) Fe(Ⅱ)		Fe(Ⅲ)-[illegible]偶氮胂、Fe(Ⅱ)-邻菲罗啉	512 610	-	120	0.2~2.0		<5	双检测器	88
Fe	大气水	邻二氮菲	512	150	—	0~2.5	<20	0.91	用 WYX-401 型原子吸收分光光度计检测	89
	铁矿石	氧化还原滴定	550	-	10~12	(2.3×10^{-3}~6.08×10^{-3}) mol·L⁻¹	—	—	采用梯度稀释原理	90
Fe Ti	地质样品	钛铁试剂	550 415	200 100	80	0~32 0~8		-	交替注入试样	91
Fe^{2+}、Fe^{3+}	工业废水	邻菲罗啉	—	-	120	0~6		—		92
全铁	植物	邻菲罗啉	—	-	80	5~50	—	—		93
Gd、稀土	稀土	偶氮胂Ⅲ	—		50	0~40			用 P507 树脂色层分离稀土及阳离子交换树脂分离高纯铝中稀土杂质	94
Gd Y	混合稀土	CYDTA-Gd(Y)-二甲酚橙	636	120	—	—	—	—	选取不同淋洗剂可实现单一稀土的测定	95
Hg	工业废水	meso-四(4-三甲胺苯基)卟啉	—		—		—	-		96
	环境水样	Hg(Ⅱ)-$K_4[Fe(CN)_6]$-邻菲罗啉	480	30	—	0~0.025	·	-	[illegible]	97
Hg	废水					0~75ng/ml			冷蒸 FIA	98
	水	m-Cl-TPPS			60	0~12			停留测定	99

续表

被测组分	试样	反应体系或试剂	测定 λ/nm	进样体积/μl	采样频率/(次·h⁻¹)	测定范围/(μg·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)	RSD/%	备注	文献
[illegible]	水样	当散了酮	480		120	0~0.012	0.75	5.4		100
	粮食	氨胺丁香吸元素	595	250	50	0~0.01	3.2	0.8	利用不稳定中间产物	101
	化妆样	—	—	—	120	0.002~0.05	—	—	抽停 FIA	102
	地质样	利用其对 1,4-TMB-DPM 与氨胺丁反应的催化作用				0~15μg·ml⁻¹	—			103
Ir(IV)	人工合成样	KIO_4-α-萘胺蓝	640	120	61	0.05~0.40	25	1.2		104
IO_3^-	海水	5-Br-PADAP 和 SCN^-	550	120	54	(2.0×10^{-5})~(2.0×10^{-3}) mol·L⁻¹	8×10^{-3} mg·L⁻¹	—		105
K P	植物	火焰光度法(K)钼蓝法(P)	420		150	15~240 5~60			分光光度与火焰光度计连用同时测定	106
K、Na P	植物	火焰光度法(K、Na)钼蓝法(P)		—	60	K, 5.0~60 Na, 6.0~40 P, 1.0~4.0	—	1.0 1.1 1.4	同上	107
Mn	饲料饲料	Mn^{2+}-KIO_4-CG-NTA 体系	635	—	—	0~0.03		1.38	停流反相 FIA	108
	自来水、河水、井水	Mn^{2+}-NaH_2PO_4-KIO_4-NTA	236	10ml	—	0~0.005	0.05	3.0	间停流、反相 FIA	109
	水	Mn^{2+}-KIO_4-孔雀绿	615	—	5	0~0.0072	0.07	3.9		110
	中药液	KI-I_2-Mn(I) 体系	400	—	—	0~1800	—	—	间接法测定	111
	水样	Tiron-H_2O_2	—	—	40	0~(5.0×10^{-5}) mol·L⁻¹	—	1.2~5.6		112
		—	—	—	—	0~0.04	1.0			113
	江湖水	Mn^{2+}-KIO_4-孔雀绿	615	—	—	0~0.0072	0.07	<3.9	停留 10min 52℃	114
	天然水	镁试剂、邻菲罗啉、H_2O_2 及混合型缓冲液等	—		—		5.12×10^{-4} mg·L⁻¹	0.84		115
	环境水	孔雀绿-KIO_4-氨三乙酸钾催化体系			25	(0~40) (40~250) ng·ml⁻¹				116
	水样、土壤、粮食	NTA-孔雀石绿-KIO_4 催化体系	—		24	0~0.35	—	—		117
	人发及水样	—	—	—	—	(0.03~[illegible]) ng·ml⁻¹	—	—	催化光度法	118
Mo W	钨酸钠矿 溶液	KSCN-硫脲 KSCN-$TiCl_3$	— —	—	110 110	~15 ~50	200 1000	1.54	过程控制	119
Mo	环境水样品	MO-SCN-MG 体系	585	250	24	0.04~0.25		<1.0	停流 3 分	120
	植物、海藻	KSCN、罗丹明 B		—	105	0.05~1.6	4.7	25		121
Mo、W Ti	钢样	9-Salicylfluorone (2,3,7-trihydroxy-9-…fluorone)	—	50~80	50~80	0~20 0~1.2 0~0.6	—	—		122
Mo	天然水、水井水样		350	100		0~0.4	1.5			123

续表

检测组分	试样	反应体系或试剂	测定 λ/nm	进样体积/μL	采样频率/(次·h⁻¹)	测定范围/(μg·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)	RSD/%	备注	文献
Mo	植物	Mo-SCN-RhB	600	50	120	0~1.5	20	0.7	人萃取，H液掩除加工腿技1号	124
	钢铁	SCN				0~20			测定0.1%~2%含量的钼	125
	土壤、粮食、人发	Mo(VI)-H_2O_2-KI-淀粉	580	170	120	0~2.4	3.2	0.5		126
	岩石	KI-H_2O_2体系	—	—	60	—			催化光度	127
	钢样	PV-CV体系	—	—		20~500	—	—		128
	合金钢	SAF体系	—	—	150	0~0.5	—	—		129
	低合金钢	SCN 体系		—	150	0~10	—	1.5		130
NH_4^+-N	水	混合指示剂	590	2.5ml	30	依富集时间长短而定	2	1.2	气体扩散分离富集	131
全N	森林降雨	靛酚蓝体系	670		90		—			132
联氨	电厂炉水	对二甲基苯甲醛	470	400		0.02~2.4		<0.5		133
NO_2^--N	天然水	α-萘乙二胺、磺胺及溶解钾氧化	535	30 或	60	0~0.1	2	1.67	合并带	134
NH_4^+-N				+8000	40	0~0.1	2			
NO_2^--N	天然水	N,N'-二(3-羟丙基)苯胺(BHPA)	500	280	50	0~0.12	0.5	0.7	80℃	135
	水、果汁、蔬菜、食品	对氨基苯磺酸萘胺	540	200	90	0~0.1				136
	河、湖水	N,N'-二(2-羟丙基)苯胺(BHPA)	500	125	40	0~90 μmol·L⁻¹	10⁻⁵ mol·L⁻¹	0.4	补加酸，光程3cm	137
	土壤浸出液	H_2SO_4，FIA反滴定	610	100	100	—	—		—	138
										139
NH_3	血清	酚红指示剂	560	200	60	0~2.5	30	0.90	气体扩散	140
NO_3^--N	天然水	3,5-二氯苯甲酰胺	210		40	40~120	-	1.4~	—	141
NO_2^--N			176			0.1~2.4		2.4		
N(全氮)	植物	靛酚蓝法	650	45		0~400	—	<2	—	142
N^{2}	电镀液	NaCl	410	144	240	0~10%		0.21		143
N_2H_4			450	400		0.01~0.4		<1.0		
PO_4^{3-}	火力发电	钼黄	425	200		0~25	—	<1.0	反相FIA	144
SiO_3^{2-}	厂锅炉水	钼蓝	790	200		0~2		<2.0		
NO_3^--N	水	镉柱，N-1-萘基-乙二胺盐酸盐	543			0~1.3	—	0.08~1.42		145
P	天然水	乙基紫-钼杂多酸-Triton X-100体系	553	250	100	0~0.1		2.1		146
	磷青铜	钼黄	450	200	180		—	1.17	50℃	147
	矿石酸溶液中金属	钒钼黄	450	25		50~500		0.92 1.46		148
	磷化溶液	钒钼黄	450	100	120	(2~30)%		0.7		149
	电厂锅炉水	钒钼黄	430	40	80	0~25		<1.0		150
	锅炉水	钼蓝($SnCl_2$)	790	50	140	0.5~3.2	—	2	30℃	151

续表

被测组分	试 样	反应体系或试剂	测定 λ/nm	进样体积/μl	采样频率/(次·h⁻¹)	测定范围/(μg·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)	RSD/%	备 注	文献
P	地矿样品	钼蓝法	670	50	120	0~4		0.54	合并带	152
	土壤	钼蓝($SnCl_2$)	660		120	1	—		活性炭脱色	153
	磷酸肥料	钼蓝	670		120	1	—			154
PO_4^{3-}	锅炉水	钼蓝($SnCl_2$)	670		40	0.05~6		0.65~1.2	反相FIA	155
SiO_3^{2-}		硅蓝(Vc)				2~20		0.28~1.5		
PO_4^{3-}	冷却水	钼锑抗	710	350	124			1.0		
聚磷		体系		150	120~144	—	—	1.0	在线水解	156
有机磷				150	120~144			1.0	在线紫外分解	
Pb	—	四(4-三甲铵苯基)卟啉		82.4	300	0~10				157
	复合膜	亚硝化物	274		30	—	—	—	直接进样	158
	陶瓷、皮革	meso-四(4-三甲基铵基)卟啉	465	170	80	(0~4) μg	0.52	—		159
Pt(Ⅳ)	二次阳极泥或氯化物	DBC-偶氮氯膦	620	100	62	0.2~6.0		1.9~3.5		160
Pd(Ⅱ)	矿石	磺胺偶氮氯膦	620	100	60	0.2~5.0	100	<1.0		161
	钯的二次精矿	5-Cl-PADAB 5-Br-PADAP	—	100	120	—	—	—		162
	铂钯二次精矿	氨基G酸偶氮氯膦	634	120	60	0.2~5.0	120	<1.0		163
	二次阳极泥和氯化渣	DBC-偶氮胂	525	100	62	0~8.0	150	2.8		164
	二次阳极泥和氯化渣	DBC-偶氮氯膦	517	100	78	0.2~5.0	50	—		165
	阳极泥氯化渣、铂钯矿	对硝基偶氮氯膦	525	100	80	0.1~8.0	50	4.0		166
	二次阳极泥氯化渣	DCB-偶氮胂	531	100	90	0.5~16	200	—		167
	冶金样品	DCS-偶氮胂	535	100	90	0~8.0	50	0.57~2.4	80℃	168
	矿石	三种显色剂，用光纤检测器检测	650	94	70	1~3	50		80℃	169
			640			1~4				
			530			1~5				
	二次阳极泥	DBS-偶氮胂	625	100	65	0~6.0	100	—	80℃	170
	二次精矿二次浸出液	Pd(Ⅱ)-金橙G-溴化十六烷基吡啶	536	400	70	1~10	400	—	130℃	171
		三溴偶氮胂	617	100	90	0~7	100	—	80℃	172
Si	电厂水	钼蓝法	780	250	60	0.005~6		0.9~2.9		173
Si P	水	钼黄法测硅 然后加$SnCl_2$	680	300	100	0.01~0.03 3~50	4.3 1700	—		174
Si	—	钼蓝(VC)	720	—		0~20	—	0.7	(38±2)℃	175
P		钼蓝($SnCl_2$)	680			0~4		0.4	反相FIA	
SO_4^{2-}	土壤	$BaCl_2$比浊法/乙醇	410	200	180	0~50	500	3	间歇双停流光学系统	176

续表

被测组分	试样	反应体系或试剂	测定λ/nm	进样体积/μl	采样频率/(次·h⁻¹)	测定范围/(μg·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)	RSD/%	备注	文献
SO_4^{2-}		$BaCl_2$·明胶	360 650	175		3~30 20~30			25℃	177
Si	钢铁	钼酸铵，氯化亚锡	740	120	90	0.0~50	250	0.80		178
SiO_3^{2-}	电厂炉水	硅钼蓝	780	150	60	0.55~6.0	…	0.55~1.0	反相FIA	179
	电厂炉水	钼酸铵	810	200	70		150	1.5		180
B	海水，自来水	Cu(Ⅱ)-PAR-TritonX-100体系	479	80（海水） 240（自来水）	30	0~1.8 0~1.6	40	1.0		181
SO_2	大气	甲醛，盐酸副玫瑰苯胺	580	130	40	1~13		0.90		182
SiO_3^{2-}	电厂炉	硅钼蓝，磷钼蓝		150	80	2~30		1.0	反相FIA同时测定	183
PO_4^{3-}	水			(500) (1500)		0.5~6				
S^{2-}	水	S^{2-}-Fe^{3+}-邻菲罗啉	510	130	20	0.25~25	—	<1	气体扩散27℃	184
SO_4^{2-}	自来水	$BaCl_2$			60	20~200 (40~140)				185

本章参考文献：

1 郭跃先，王世天．仪分，1986；10(2)：38
2 赵承义，马成龙等．分析试验室，1992；11(3)：15
3 陈维芳，史乃宏等．分析测试通报，1990；9(3)：39
4 张国宏，吴伟天．上海环境科学，1987；(8)：34
5 杨 欣，孙汉文等．高等学校化学学报，1992；13(11)：303
6 邓祥义，陈 华．岩矿测试，1994；13(3)：193
7 郑国权，丁培旭等．分析化学，1992；20(7)：815
8 刘绍荣，夏乃云．中国有色金属分析情报网（CNAI）第二届FIA学术报告．1988；13．柳林
9 陈兴国，鲁西洋等．分析试验室，1990；9(6)：28
10 李 双，李晓鸿等．第 届全国FIA学术报告会．1987；1．沈阳．A-12
11 袁有宪，王欣革等．分析化学，1988；16(6)：546
12 Yuan Youxian．Anal．Chim．Acta，1988；212：251
13 郭增宁，陶永华．同10，A-26
14 Chen D，Cai R et al．Flow Analysis Ⅳ，No 36，April，1988；Las Vegas，USA
15 冯世华，方肇伦．理化检验，1993；29(4)：226
16 顾凤红，刘其良等．理化检验，1991；27(4)：311
17 毛丽华，张佑鹏等．同10，A-5
18 李方春，何 斌．痕量分析，1989；5(4)：55
19 卢 艳，丁振安．第二届全国流动注射分析学术报告，A16，1985．沈阳
20 毛群福，张仿仙等．岩矿分析，1991；7(2)：53
21 戚文彬，顾浩桐．上海环境科学，1991；10(8)：31
22 沈含熙，刘大超等．冶金分析，1993；13(2)：6
23 曲祥金，徐曦兰．化学世界，1994；35(5)：262
24 蒋丹宇，康焕杰．中国化学会第五届全国无机微量及痕量分析学术讨论会论文摘要集，B65，1988；9 西安
25 马成龙，杨建刚等．同10，A-2
26 朱克静，方肇伦等．同8
27 范世华，方肇伦．同19，A-28
28 马成龙，杨建军．分析化学，1989，17(3)：247
29 刘敏华．食品与发酵工业，1990；(5)：76
30 赵岭文，陈华．理化检验，1962；26(1)：85
31 丁振安，徐丽娟．环境保护科学，1994；20(2)：52
32 孙鹤令，赵承义．化学试剂，1993；15(3)：136
33 马 为，郑国全．理化检验（化），1994；30(3)：170
34 魏双鑫，吴志祥．同19，A23
35 Zhu Zhaohai，Fang Zhaolun．Anal Chim Acta，1987，198：25
36 赵锦祥，陈寿松．高等学校化学学报，1990；11(10)，1141
37 Ma Huichang，Liu Jingfu．Anal Chim Acta，1992，261：247
38 马杰昌，刘景富等．分析化学，1993，21(5)：426
39 马惠昌，冯建章等．北京大学学报（自），1993，29(4)：383
40 刘景富，马惠昌．中国科学院研究生院学报，1994，11(1)：93
41 马惠昌，刘景富．岩矿测试，1993；12(4)：263
42 王鹏飞，马 人．环境与开发，1994；14(5)：21
43 袁有宪，王欣革等．同10，A-22
44 李万春，何 敏．同8
45 曾荷娟，陈立国．同8
46 袁有宪，王欣革等．分析化学，1989；17(1)：65
47 胡新成，陶良枫．理化检验（化），1989；25(4)，227
48 徐洪英，袁有顺．同19，A11
49 李万春，何 斌．分析试验室，1990；9(3)：5
50 李华昌，倪瑞林等．高等学校化学学报，1992；13(2)，171
51 李华昌，谢凯娜等．分析试验室，1992；11(3)，17
52 钱庆阳，王胜天等．中国化学会全国第二届无机微量及痕量分析学术讨论会论文摘要集，D-28，1986，9．西安
53 郑国良，李和平．同19，A18
54 张爱梅，刘超杰．冶金分析，1990；10(5)：24
55 王 鹏，沈裕红等．上海环境科学，1992，11(2)：19
56 Chen Xingguo，Xu Yaojun，et al Anal Lett．1993，26(9)：805
57 李赞联，陈忠信等．同10，A-6
58 马文秀，钱梅青．同57
59 陈兴国，刘惆仑等．同10，A-13
60 张渊平，岳振灵等．同10，A-12
61 丁守礼，郑伟花．同10，A-5
62 袁有宪．海洋学报，1987，9(1)，59
63 袁有宪，曲克明等．海洋科学，1987；(5)，32
64 袁有宪，曲克明．海洋与湖沼，1988；19(2)：157

65 陈兴国，刘腾仑等. 冶金分析，1989；9(3)：42
66 孙惠珠，王子立等. 兰州大学学报（自），1990，26(1)：40
67 张海平，秦文华. 同 15，A6
68 郑学华，毛屏满等. 分析试验室，1992；11(2)：15
69 方正义，周乐涛等. 分析化学，1991；19(10)：1173
70 康有美，王子生等. 分析化学，1991；19(4)：468
71 赵翰文，陈 华. 冶金分析，1992；12(3)：53
72 陈 川，赵彦涛. 分析化学，1992；20(5)：618
73 李华昌，陈新荣等. 中南矿冶学院学报，1992；23(1)：128
74 戴世华，方学伦等. 分析试验室，1991；10(5)：32
75 Tian Liqing，Wu Saoming. Anal Chim Acta，1991；261：351
76 吴浙宝，田世胜. 分析试验室，1993；12(4)：76
77 刘 宏，高海涛等. 临床检验杂志，1994；12(4)：175
78 付 昆. 分析试验室，1986；5(12)：4
79 魏汉渊，任 英. 理化检验（化），1991；27(2)：71
80 于景安，张 炯. 理化检验（化），1988；24(2)：87
81 白振昆，吴 囡. 全国有色地质岩矿分析第一届学术交流会暨东北，华北协作区有色地质冶金，地质岩矿分析学会论文摘要. 5-5，1987.6 丹东
82 钱振彭. 稀有金属，1987；11(2)：156
83 徐 基，董秀琪. 同 8
84 余 锐. 同 8
85 董正祥，黄文庆等. 同 24，D-88
86 杨建乐，马成龙等. 分析仪器，1988；(2)，5
87 徐 基，袁秀琪. 环境化学，1989；8(4)：35
88 陈升华，蔡波贤等. 分析化学，1992；20(1)：86
89 梁裕义，戚华. 光谱仪器与分析，1992；(2)：13
90 陈凯宏，马金红. 理化检验，1991；27(1)：30
91 肖正柱，任 英. 理化检验，1992；28(5)：265
92 何光涛，李国川. 真空科学与技术，1993；13(1)：46
93 戴学智. 光谱仪器与分析，1985；(1)：28
94 田 生，王海宝. 分析试验室，1992；11(2)：59
95 肖胜林，任 英. 分析化学，1992；20(4)：390
96 李解元，张学敏等. 同 24，D-73
97 吴金铭，山宫辉. 仪器仪表与分析监测，1992，(1)：36
98 王建华，何荣臣等. 烟台师范学院学报（自），1994；12(2)：125
99 Peng Xuejun，Man Qiankai et al. Mikrochim Acta，1994；114(1/2)：91
100 杨丽丽，张成学. 同 19，A-71
101 徐敏红，孙陵超等. 分析试验室，1992；11(1)：15
102 张兴思. 杭州冶金地质学院学报，1994；11(1)：56
103 李锦荣，四 一文等. 岩矿测试，1993；12(1)：11
104 何采彬，蔡亦成等. 分析化学，1990；18(3)：237
105 Chen Xingguo，Zhao Xinwei et al. Mikrochim Acta，1991；1：129
106 蔡亚庆，吴金展. 化学通报，1991；(11)，41
107 吴重强，蔡亚岐等. 分析化学，1992；20(2)：195
108 朱衍光，邓丽华等. 同 24，E-41
109 康有美，王秋萍等. 分析化学，1988；16(4)：315
110 李开建，任 英. 同 8
111 陶洪权，郭新成等. 理化检验（化），1989；25(4)：207
112 Yang Jinzhou，Ma Chenglong et al. Anal. Chim. Acta，1990；235：323
113 张寿国，张全科. 第三届全国动力学分析学术报告会论文集，1990，10（无锡）203
114 李开建，任 英. 分析化学，1990；18(11)：1041
115 杨建勇，戚树仁. 应用化学，1991；8(2)：75
116 肖春荣，王嘉芝等. 化学工业与工程，1993；10(4)：56
117 雷宁勤，张立国等. 理化检验（化），1994；30(2)：86
118 孙北雁，彭安顺等. 分析试验室，1993；12(5)：53
119 邓东元. 同 8
120 戚文彬，陈笑梅. 同 15，A19
121 徐 平，袁秀顺. 第一届长春国际分析化学学术会议论文摘要集，1990，8，长春，105
122 陈俊华，王新红. 同 121，209
123 刘德家，张爱梅. 同 113，131
124 徐 杰，袁秀顺. 分析化学，1992；20(3)，319
125 韩宣伟. 冶金分析，1991；11(6)，26
126 刘建忠，陈爱瑛. 营养学报，1991；13(1)，66
127 李 新，蔡敏欣等. 海洋科学，1991；(2)，12
128 宋萌平. 理化检验（化），1993；29(6)，355
129 沈全林，刘玉国等. 冶金分析，1993；13(3)，1
130 何晓东，黄凤华等. 冶金分析，1993；13(3)：51
131 朱兆海. 同 24，E-18
132 徐立东，安永林. 同 15，A-7
133 谭忠洋，张海平. 同 8
134 康有美. 分析化学，1987，15(5)：454
135 万威端，李水元二等. 同 19，A 27
136 赵风林，姚建军. 同 8
137 万威端，李水石二等. 同 19，A 2
138 蒋齐辉. 同 19，65
139 庞其润. 同 19，A14
140 孙成林，方学伦. 同 18，A27
141 吴兰萍，陈国仁等. 上海环境科学，1990；9(5)：25
142 刘绍文，王乃有等. 光谱仪器与分析，1991，(2)：25
143 林宇鹏，张需刚等. 理化检验（化），1991；27，27
144 张厚平，潘国洋等. 分析试验室，1990；9(6)：37
145 刘 宏，戴延春. 光谱仪器与分析，1991；(1)：4
146 席有烈，曲克明. 分析化学，1987；15(11)：1029
147 高学礼. 同 8
148 Chen，Y. Zhao T. Flow Analysis IV，No 39，April 1988，Las Vegas，USA
149 王明枫，杨开运等. 理化检验（化），1988，24(5)，304
150 李宏伟，张海平. 同 8
151 李永生. 同 8
152 徐德宏，贾学武. 同 8
153 白岩鸣，金万一. 同 10，A-17
154 徐立东，安永林等. 同 10，A-7
155 李永生，程宏祥等. 同 10，A 15
156 赵秉智. 同 10，A-25
157 郭振先，陈明华等. 同 24，B 13
158 Danielsson L-G，Zhao Huazhang. Flow Analysis IV，No. 104 April. 1988，Las Vegas USA
159 孙孝德，张治伟等. 分析化学，1988；16(10)：353
160 蔡亚岐，何尽存等. 高等学校化学学报，1989；10(12)：1194
161 陈兴国，徐惠平. 分析化学，1989；17(11)，1033
162 陈兴国，刘腾仑. 分析化学，1989；17（3）：249
163 徐惠平，陈兴国等. 分析试验室，1989；8(2)：17
164 何基存，蔡亚岐等. 分析试验室，1990；9(1)：19
165 何基存，蔡亚岐等. 黄金，1990；11(4)：39
166 陈兴国，王文斌等. 冶金分析，1990；10(1)：23
167 蔡亚岐，何基存等. 冶金分析，1990；10(4)：14
168 He Xingcun，Cai Yaqi et al. Anal Chim Acta，1992；256，113
169 Xu Yanjun，Chen Xingguo et al. Anal Chim Acta，1992；262：92
170 柯昌介，蔡亚岐等. 航天医学与医学工程，1994；7(2)：85
171 马立娇，陈兴国等. 分析化学，1992；20(8)：936
172 蔡亚岐，何基存等. 化学试剂，1991；13(1)：1
173 李永生. 同 8
174 胡文忠，严明光. 同 10，A-14
175 沈宗华，肖凤琴. 同 8
176 蔡云华，张小芳等. 同 15，A 28
177 雷世平. 工业水处理，1987；(2)：50
178 李切敏，张洪波. 理化检验（化），1989；25(1)：45
179 李永生. 理化检验（化），1990；26(1)：41
180 高宝铎，张丽平等. 同 15，A7
181 袁有秀，王平生等. 同 19，A23
182 孔 琳，徐学智等. 沈阳药学院学报，1989；6(4)：265
183 李永生. 分析试验室，1991，10(2)：41
184 侯学华，梁剑宏. 分析化学，1992；20(7)：841
185 吴文静，石伟等. 化学通报，1991；(1)：32

第九节 浮选吸光光度法

一、浮选吸光光度法概述

浮选吸光光度法是将浮选技术和吸光光度测定方法相结合的一种光度分析法。浮选技术是利用气泡的作用使溶液中有表面活性的成分或能与表面活性剂结合的非表面活性的成分聚集在气-液界面与母液分离的方法。常用的浮选技术有3种：沉淀浮选法、离子浮选法和溶剂浮选法。

沉淀浮选法是Baarson[185]等人于1963年提出的，是利用待测元素与加入的试剂生成沉淀或被吸附在胶体沉淀上而被浮选。沉淀浮选中有的需要加入表面活性剂，以帮助生成的沉淀上浮至液面；有的不需要加入表面活性剂，而是利用待测元素与加入的亲水性试剂生成的疏水性物质可附着在气泡上而被浮选。

在沉淀浮选法中常用的无机沉淀剂多为能在水中水解能形成胶体氢氧化物的盐类，如氯化铁、氯化铝及某些硫化物等。常用的有机沉淀剂有双硫腙、巯萘剂、黄原酸盐等。由于沉淀与捕收剂之间仅存在静电引力，而非化学计量反应，所以表面活性剂用量极少，只需形成稳定泡沫就可以。在用有机试剂沉淀的浮选中，一般不用表面活性剂。

离子浮选法是Sebba[186]于1959年提出的。它利用表面活性物质（常称为捕收剂）与离子形成疏水性配合物附着在气泡上，而后浮选分离。用于浮选的捕收剂分为阴离子、阳离子和螯合捕收剂3种。常用的阴离子捕收剂为烷基硫酸盐、烷基磺酸盐、高级羧酸盐等。常用的阳离子捕收剂是8～18碳原子的烷基胺。常用的螯合捕收剂有：二烷基二硫代氨基甲酸盐、氨基苯硫酚、1-(2-吡啶偶氮)-2-萘酚等等。许多螯合萃取剂都可用作螯合捕收剂。由于离子与表面活性剂是形成化合物，故其量必须稍多于化学计量，但不能高于其临界胶束浓度，否则将产生胶束增溶作用而降低气-液界面的吸附。

溶剂浮选法是Sebba[187]于1962年提出的。其原理与离子浮选法相似，不同之处是将浮升物直接溶于试液表层的有机溶剂中。在溶剂浮选中，只是在水-有机相界面建立平衡，它不涉及萃取的分配平衡问题。故它的分离量大，富集倍数高。

以上浮选方法均用通气鼓泡以达到浮选目的。所用气体可以是压缩空气、氮气等。借助微细气体分散器（通常为G_4或G_3玻砂滤板）产生直径在0.5nm以下气泡，通气速度多为每分钟(20～30)ml，通气时间为几分钟到20min。泡沫层（离子浮选）或浮渣（沉淀浮选）与母液的分离，可用倾出法或用玻璃刮铲、吸量管等器具分离。文献[188]介绍了一些实验室用浮选分离器械和连续式泡沫分离器。分离出的泡沫或浮渣，经化学处理后可用吸光光度法测定，溶剂浮选法可以直接对有机相进行分析，浮选吸光光度法的有关综述可见文献[189,190]。

二、浮选吸光光度法应用

表 14-14 浮选吸光光度法应用实例

待测元素	沉淀剂或显色剂或其他试剂	表面活性剂或收捕剂	测定条件	文献
Cr	$Fe(OH)_3$ 或 $Al(OH)_3$	十二烷基硫酸钠	$Fe(OH)_3$：pH=4.5～6 $Al(OH)_3$：pH=5.5～7.5	1,2
Cu	$Fe(OH)_3$	十二烷磺酸钠	pH>7	3
Sc	$Fe(OH)_3$	油酸钠	pH=6～9	4

续表

待测元素	沉淀剂或显色剂或其他试剂	表面活性剂或收捕剂	测定条件	文献
Ag	曙红、邻菲罗啉	十二烷基磺酸钠	pH=4.0～5.5	5
	碘化钾，氯化亚锡，孔雀绿	聚乙烯醇	—	6
As	结晶紫	十二烷基硫酸钠	0.09mol·$L^{-1}H_2SO_4$	7
CN^-	氯胺T-异烟酸吡唑啉酮	CTMAB	溶剂：乙醇；pH7；λ_{max}=638nm；ε=5×10^{-4}	8
Co	亚硝基R盐	CTMAB	溶剂：正丁醇；pH—5～6；λ_{max}=530nm	9
Cr	二苯卡巴肼	十二烷基磺酸钠	—	10
	二苯卡巴肼	十二烷基磺酸钠	—	11
Fe	二氮杂菲	十二烷基硫酸钠	—	12
	二氮杂菲	十二烷基硫酸钠	—	13
Hg	碘化钾，氯化亚锡，结晶紫	聚乙烯醇	—	14
I	饱和溴水	CTMAB	溶剂：苯；pH=0～2.5；λ_{max}=365nm	15
Mo	溴焦棓酚红	氯化十六烷基吡啶锚	—	16
NO_2^-	对氨基苯磺酰胺，N-萘乙二胺	十二烷基磺酸钠	—	17
	对氨基苯磺酸，N-萘乙二胺	十二烷基磺酸钠	—	15
	对氨基苯磺酸钠，盐酸萘乙二胺	十二烷基硫酸钠	—	18
NO_3^-	对氨基苯磺酰胺，N-萘乙二胺	十二烷基硫酸钠	—	19
	对氨基苯磺酸钠，盐酸萘乙胺	十二烷基硫酸钠	—	20
PO_4^{3-}	钼酸钠	若丹明B	—	21
	亚甲蓝	SDS	—	22
	N,N-二甲基对苯二胺	十二烷基磺酸钠		15
U	偶氮胂Ⅲ	氯化十四烷基二甲基苄胺	—	23 24
As	钼酸铵	结晶紫	溶剂：甲苯	25
Au	—	结晶紫	溶剂：甲苯	26
Cu		二乙基二硫代氨基甲酸钠	溶剂：异戊醇；pH=6.0～6.4；λ_{max}=430nm	27
Fe	3-(2-吡啶)5,6-二苯基-1,2,4-三吖嗪	十二烷基磺酸盐	溶剂：异戊醇	28
Hg	碘化钾	次甲基蓝	溶剂：环己烷；[H^+]=0.45mol·L^{-1}；λ_{max}=670nm；ε=15×10^{-4}	29
I	饱和溴水，碘化钾	溴化十六烷基三甲铵	溶剂：苯	30
Ni	—	1-(2-吡啶偶氮)-2-萘酚	溶剂：甲苯；pH=3～11；λ_{max}=585nm	31
SiO_3^{2-}	钼酸钠	咯吡唑(Ⅰ)	溶剂：甲苯-丙酮	32
	钼酸盐	孔雀绿	溶剂：甲基异丁基酮	33
Te	溴化钾	罂粟碱	溶剂：甲苯	34
油	—	—	溶剂：石油醚；λ_{max}=350nm	35
酚	4-氨基安替比林	溴化十六烷基三甲铵	溶剂：正戊醇	36

本表参考文献：

1 Huang S. D. at al. J. Colloid Interface Sci, 1982; 89: 504
2 Huang. S. D. at al. Sep. Sci. Technol, 1984; 19: 603
3 Bai B at al. J. Electrochem. Soc India, 1988; 37: 171
4 Liang S. at al. Anal. Chem, 1984; 313: 19
5 郭雅先，牛凤兰等. 吉林大学自然科学学报，1988; (4): 79
6 张升晖，陈显堂等. 化学试剂，1992; 14: 239
7 方宇翘，滕德瑶. 环境化学，1988; 7: 53
8 章 瑛，阳 龙. 分析试验室，1988; 9: 10
9 章 瑛. 冶金分析，1989; 9: 56
10 方宇翘，滕德瑶. 工业水处理，1986; (6): 47
11 赵国良，王上天等. 环境科学丛刊，1986; 7: 30
12 Yamada K, et al. Bunseki Kagaku, 1985; 33: 99
13 艾大年，邢大荣. 分析化学，1987; 15(4): 359
14 陈显堂，张升晖等. 高等学校化学学报，1991; 12: 1028
15 李 力，陈鸿振. 上海环境科学，1991; 10: 28
16 Andreva I Y, et al. J Anal Chem (USSR), 1985; 40: 564
17 Aoyama M, et al. Bunseki Kagaku, 1982; 31: E99
18 方宇翘，滕德瑶. 环境科学，1987; 15: 359
19 Aoyama M, et al. Bunseki Kagaku, 1982; 31: E163
20 方宇翘，滕德瑶. 上海环境科学，1986; 5: 28
21 Nasu T, et al. Anal. Sci, 1989; 5: 449
22 Aoyama M, et al. Bunseki Kagaku, 1982; 31: E7
23 Sekine K, et al. Anal Chim Acta, 1972; 62: 468
24 Sekine K. Kikrochim Acta, 1975; 1: 313
25 Kunze S, et al. Mikrochim Acta, 1989; (1/2): 147
26 刘志明，刘嘉敏等. 理化检验(化)，1991; 27: 34
27 董慧茹，乐秀毓. 分析化学，1986; 14(8): 569
28 小汪奎也等. 分析化学(日)，1977; 26: 475
29 金继红，王于珍等. 岩矿测试，1989; 8: 119
30 刘志明，乐秀毓. 分析化学，1990; 18: 78
31 Dong H R, et al. Anal. Sci, 1989; 5: 601
32 Dorokhova E N, et al. Ж. Anal. xuu, 43: 265
33 Motomizu S, et al. Analyst, 1990; 115: 1627
34 Skripchuk V G, et al. Зabog. лаб, 1983; 5: 45
35 董慧茹，姜美玉等. 理化检验(化)，1992; 28: 98
36 王志锉，刘昕昕. 环境化学，1989; 8: 38

第十节 固相吸光光度法

一、固相吸光光度法概述

直接测量吸附在固相上待测离子的有色物质的吸光度的光度分析法统称为固相吸光光度法，根据所用的固相材料的不同又可分为：树脂相吸光光度法，凝胶相吸光光度法，泡沫塑料相吸光光度法和萘相吸光光度法。此法特点是将富集和显色结合在一起，简化了手续，提高了灵敏度和选择性[191]。

固相吸光光度法中的显色方法，视待测离子和显色剂性质可采用3种不同的方法。

第一种方法是固体吸附剂与显色剂一起加入试液。当显色剂有很高的选择性，与待测离子生成的有色络合物能被固体吸附剂吸附时，可以应用此方法。

第二种方法是显色剂先吸附于固体吸附剂上，然后加入试液。当有色络合物不能直接从试液中吸附于固体吸附剂上时用这种方法。在测定条件下固体吸附剂吸附显色剂必须是不可逆的。

第三种方法是待测离子先吸附在固体吸附剂上、然后加到显色剂溶液中。这种方法适用于显色剂对待测离子选择性差的情况。

萘相吸光光度法是将固体萘加入含有待测离子和显色剂的溶液中，加热至萘熔化，再冷至室温，待测离子的配合物形成在萘微晶上而显色。

对已显色的固定相进行吸光光度测量时，树脂相、凝胶相和萘相的测量原理均相似，而泡沫塑料相的测量原理则有所不同。显色树脂(或凝胶、萘)的总吸光度为

$$A_{总}=A_{配}+A_{树}+A_{显}+A_{溶} \tag{14-24}$$

当待测离子的络合物几乎完全吸附在树脂上时，固相树脂微粒间隙中溶液的吸光度 $A_{溶}$ 可以忽略。如果显色剂本身无色，固相中游离的显色剂的吸光度 $A_{显}$ 也可以忽略，若再以相似条件下制备的空白树脂作参比。

此时

$$A_{总}=A_{配}=\varepsilon_{配}\,l_{树}\,c_{配} \tag{14-25}$$

因

$$c_{配}=\frac{c_0V}{m(1+V/Dm)} \tag{14-26}$$

式中，c_0 表示原始试液中待测离子浓度，$mol \cdot L^{-1}$；m 是树脂的质量，g；V 是试液体积，ml；D 为待测离子的分配系数，$ml \cdot g^{-1}$。将(14-26)式代入(14-25)式，则得

$$A_{配}=\varepsilon_{配}\,l_{树}\,c_{配}=\varepsilon_{配}\cdot l_{树}\cdot c_0V/[m(1+V/Dm)] \tag{14-27}$$

式中，$\varepsilon_{配}$ 为树脂相中待测离子有色络合物的摩尔吸光系数；$l_{树}$ 为经过显色树脂相的平均光程长度。当 D 值很大时，上式可以简化为

$$A_{配}=\varepsilon_{配}\cdot l_{树}\cdot c_0V/m \tag{14-28}$$

当试液体积和树脂量固定时，$A_{配}$ 与 c_0 成正比，这就是树脂相吸光光度法进行定量测定的理论基础。

在泡沫塑料相吸光光度法中，在实现完全萃取的前提下，以泡沫塑料空白作参比，显色泡沫塑料的吸光度与泡沫塑料的长度和宽度成反比，但与泡沫塑料的厚度无关，其关系式为

$$A_{配}=k\cdot x/a\cdot b \tag{14-29}$$

式中，$A_{配}$ 为固相中待测离子有色配合物的净吸光度；k 为常数；x 为待测离子量（μg）；a、b 分别为方块状泡沫塑料的长度和宽度。上式是泡沫塑料相吸光光度法的定量基础 。

二、固相吸光光度法应用

表 14-15 至表 14-18 给出了固相吸光光度法的部分应用实例，以供参考。

表 14-15 树脂相吸光光度法应用实测

待测元素	测定对象	显色剂	树脂（粒度）	测量方法与波长 λ/nm	线性范围或测定下限	灵敏度提高倍数	文献
As、P	水样，金属矿样	钼酸铵、酒石酸锑钾	强碱性阴离子交换树脂	单波长法 λ700	As(0～6)μg/100ml P(0～2.5)μg/100ml	60	1
Be	天然水	铬青 R	717 型-Cl^- (120～140 目)	单波长法 λ545	(0～6)μg/250ml	—	2
Bi	水样	KI	Dowexl-X_2-SO_4^{2-} (200～400 目)	双波长法 $\lambda_1$492，$\lambda_2$700	9.2×10^{-8}mol·L^{-1}	130	3
		HCl(50%iso PrOH)	QAE-Sepha dexA-25-Cl^-	双波长法 $\lambda_1$328，$\lambda_2$360	2.9×10^{-8}mol·L^{-1}	—	4
Cd	—	PAR	Dowexl-X_2-SO_4^{2-} (200～400 目)	双波长法 $\lambda_1$510，$\lambda_2$700	2.0×10^{-8}mol·L^{-1}	100	5
		PAR	负载形成螯合树脂磺酸型(200～400 目)	双波长法 $\lambda_1$510，$\lambda_2$700	1.0×10^{-7}mol·L^{-1}	85	6
	工业水	$TDPS_4$	强碱性苯乙烯阴离子交换树脂	单波长法 λ442	(0～1.25)μg/25ml	13	7
Co	水样	亚硝基 R 盐	负载形成螯合树脂－Cl^-(220～240 目)甘油悬浮	双波长法 $\lambda_1$510，$\lambda_2$650	(5～50)μg/500ml	—	8
	水样	5-Cl-PADAB	732 型-H^+(100～160 目)	单波长法 λ570	(0～8)μg/250ml	—	9
	天然水	5-Cl-PADAB	732 型-H^+ <200 目	单波长法 λ571	(0～8.4)μg/250ml	—	10
	水样	NH_4SCN	Dowexl-X_2-Cl^- (100～200 目)	双波长法 $\lambda_1$630，$\lambda_2$700	1.9×10^{-6}mol·L^{-1}	310	11
	合成试液	NH_4SCN	AmbeHyst-27-Cl^- (0.2～30μm)	单波长法(薄层) λ625	(1～15)μg	—	12
	工业废水	NH_4SCN-CTMAB-明胶	717 型阴离子交换树脂（原装）	双波长法 $\lambda_1$644，$\lambda_2$690	0.1mg·L^{-1}	—	13
	—	NH_4SCN-CTMAB-明胶	717 型阴离子交换树脂（原装）	一阶导数法 618（+），674（—）	(0～200)μg	—	14
	钨粉	5-Cl-PADAB	732 型-H^+ (60～100 目)	双波长法，$\lambda_1$570，$\lambda_2$620	3mg·L^{-1}	-	15
Cr	水样	二苯卡巴肼	Dowex 50W-X_2 H^+ (100～200 目)	双波长法，$\lambda_1$550，$\lambda_2$700	1.2×10^{-7}mol·L^{-1}	30	11
	天然水	二苯卡巴肼	负载形成螯合树脂-H^+ (200～400 目)	双波长法，$\lambda_1$550，$\lambda_2$700	(0.01～0.3)μmol·L^{-1}	150	16
	水样	二苯卡巴肼	Amberlyst 15-H^+ (0.2～30μm)	双波长法（薄层），$\lambda_1$550，$\lambda_2$700	(0～1)μg/100ml	190	17.18
	尿液	二苯卡巴肼	732 型-H^+(200～300 目)	双波长法，$\lambda_1$580，$\lambda_2$680	4.9×10^{-9}mol·L^{-1}	75	19
	金属钨	二苯卡巴肼	732 型-H^+ (80～100 目)	双波长法，$\lambda_1$540，$\lambda_2$680	0.5mg·L^{-1}	—	20
Cu	水样	锌试剂	负载形成螯合树脂 Dowex 1-X_2-Cl^- (100～200 目)	双波长法，$\lambda_1$630，$\lambda_2$700	5×10^{-7}mol·L^{-1}	9	11
	磷矿石	TAN-3，6S	负载形成螯合树脂 AB-17×8(0.1～0.25mm)	单波长法，λ582	(1～40)μg	-	21
		PAR	负载形成螯合树脂磺酸型(200～400 目)	双波长法，$\lambda_1$510，$\lambda_2$700	1.6×10^{-7}mol·L^{-1}		6
	天然水	T (4-MPy) P	Dowex 50W-X_2-H^+ (100～200 目)	双波长法，$\lambda_1$424，$\lambda_2$510	5.0×10^{-8}mol·L^{-1}	56	22
Cu Cd	水样	T-(4-TAP) P. $TPPS_4$	离子交换树脂	双波长法	Cu、Cd：μg·L^{-1}	4.8、3.7	23
Ag Pd		5-Br-PADAP. MTK	—	—	Ag、Pd：mg·L^{-1}	3.2、4.0	

续表

待测元素	测定对象	显色剂	树脂（粒度）	测量方法与波长 λ/nm	线性范围或测定下限	灵敏度提高倍数	文献
Fe	水样	1，10-二氮菲	Dowex 50W-X_2-H^+（100～200 目）	双波长法，$\lambda_2$514，$\lambda_2$700	$3.8\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	130	11
	水样	向红二氮菲	Amberlyst，15-H^+，（0.2～30μm）	单波长法（薄层），λ540	$6.2\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	—	24
	水样	Ferrozine	717 型-Cl^-（20～40 目）	单波长法，$\lambda_1$575	$3.8\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	10	25
	水样	邻二氮菲	732# 苯乙烯阳离子交换树脂（40～50 目）	单波长法，λ510		6	26
	天然水	1，10-二氮菲	Dowex 50W-X_4 H^+（200～400 目）	双波长法，$\lambda_1$514，$\lambda_2$700	（1～50）μg/200ml	50	27
	自来水	VA	717 型苯乙烯强碱性阴离子交换树脂（40～50 目）	单波长法，λ620	（0～25.0）μg/29ml	10	28
	天然水	Phen	732 型苯乙烯阳离子交换树脂	单波长法，λ510	0.04μg·ml^{-1}	—	29
	自来水井水泉水铝合金	邻二氮菲	732 型强酸性阳离子交换树脂（16～50 目）	单波长法，λ508	—	—	30
	香皂	Phen	聚苯乙烯阳离子交换树脂 IR 112 型（40～50 目）	单波长法，λ510	-	..	31
$Fe(CN)_3$		Fe（Ⅱ）	Amberlyst A-27-Cl^-（0.2～30μm）	单波长法（薄层）λ630	$7.5\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	—	32
Mo	天然水，污水，海水	溴邻苯三酚红	强碱性阴离子交换树脂（120～140 目）	单波长法，λ595	（0～30）μg/250ml	—	33
Ni		PAN	负载形成螯合树脂-Na^+（200～400 目）	双波长法，$\lambda_1$566，$\lambda_2$700	$9.8\times10^{-8}mol\cdot L^{-1}$	100	6
	水样	PAN	Dowex 50W-X_4-H^+（200～400 目）	双波长法，$\lambda_1$566，$\lambda_2$700	$1.7\times10^{-8}mol\cdot L^{-1}$	118	34
P	水样	钼酸盐	Dowex 1×8-MoO_4^-（100～200 目）	单波长法，λ705	$1.6\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	22.5	35
	环境水样	钼酸盐	Amberlyst A-27-Cl^-（0.2～30μm）	单波长法，（薄层）λ700	$2.1\times10^{-8}mol\cdot L^{-1}$	170	36，37
Pd	天然水，废水	5-Cl-PADAB	732 型-H^+（100～160 目）	单波长法，λ580	（0～12）μg	—	38
S	温泉水	DPDA	Amberlyst A-27-Cl^-（0.2～3.0μm）	单波长法（薄层），λ675	$7.6\times10^{-9}mol\cdot L^{-1}$	..	39
Si	水样	钼酸盐	Dowex 1×8～MoO_4（100～200 目）	单波长法，λ700	$8.4\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	5.4	40
U		NH_4SCN	QAE-Sephadex A-25-Cl	双波长法，$\lambda_1$300，$\lambda_2$600	$3.9\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	—	41
V	水样，钢铁，矿样	5-Br-PADAP-H_2O_2	强碱性阴离子交换树脂（甘油悬浮）	单波长法，λ590	（0～8）μg/50ml	—	42
	天然水	DFB	732 型聚苯乙烯阳离子交换树脂（100 目）	单波长法，λ485	289	289	43
Zn	天然水	锌试剂	Dowex 1-×8-Cl^-（200～400 目）	双波长法，$\lambda_1$650，$\lambda_2$800	$3.2\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	110	44
	水样	锌试剂	717 型阴离子交换树脂（240～260 目）甘油悬浮	双波长法，$\lambda_1$650，$\lambda_2$800	（0～175）μg	5.3	45

本表参考文献：

1 冯 胜，钟炽英．"中国有色金属分析情报网 1985 年光度分析会议论文摘要汇编"．70(1985，成都)
2 易瑞士，王 润．分析化学，1985；13(2)：130
3 Toshimitsu Y. et al. talanta，1979；26：273
4 Waki H and Noda S. unpublished data
5 Yoshimura K et al. Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ. Ser. C. 1978；11：181
6 吉村和久等．化学の领域，1977；31：885
7 张贵珠等，分析化学，1990；18(8)：695
8 汤福隆，刘少军．分析化学，1982；10(4)：199
9 易瑞士等．兰州大学学报，1982；18(3)：64
10 闫永胜等．分析测试学报，1995；14(4)：76
11 Yoshimura K et al. Talanta，1976；23：449
12 Suzuki，K et al. Bull. Chem. Soc Japan，1983；56：2624

13 杨泉生等. 理化检验(化), 1987; 23(4): 196
14 杨泉生等. 江西大学学报, 1987; 11(3): 40
15 戴昌沅等. 分析测试通报, 1987; 6(4): 6
16 Yoshimura K et al. talanta, 1978; 25(2): 103
17 Ohzeki K et al. Bull. Chem. Soc. Japan, 1980; 53: 2878
18 大关邦夫等. 分析化学(日), 1979; 28(11): 713
19 郭文生, 孟莉. 分析化学, 1980; 8(4): 349
20 戴厂沅, 曾广誉. 分析化学, 1985; 13(2): 122
21 Вршкин А Н. ГДДР. ЖАх. 1980; 35(12): 2294
22 Yoshimura. K. et al. Talanta, 1982; 29: 173
23 张贵珠等. "中国化学会首届微量技术及痕量分析学术讨论会论文摘要集" (上). C-13(1986 年,武汉)
24 Ohzeki K et al. Bull. Chem. Soc. Japan, 1983; 56: 2618
25 Li Shi Yu and Wei-Ping, Talanta, 1984; 31: 844
26 赵珍义等. 化学试剂. 1991; 13(2): 123
27 Nigo S et al. Talanta, 1981; 28: 669
28 黄选忠等. 理化检验(化), 1995; 31(6): 346
29 闫永胜等. 分析测试学报, 1995; 14(2): 66
30 范锦鸾等. 理化检验(化), 1996; 32(2): 111
31 闫永胜等. 理化检验(化), 1994; 30(1): 51
32 Suzuki K. et al. Bull Chem Soc Japan, 1982; 55: 2856
33 易瑞士, 张玉新. "中国有色金属分析情报网 1985 年光度分析会议论文摘要汇编", 71, 1985; 成都
34 Yoshimura K et al. Talanta, 1980; 27: 693
35 田中孝等. 分析化学(日), 1979; 28: 43
36 Matsuhisa K et al. Bull. Chem. Soc. Japan. 1981; 54: 2675
37 Matsuhisa K et al. ibid. 1982; 55: 3335
38 易瑞士等. 分析化学. 1984; 12(3): 215
39 Matsuhisa K et al, Bull. Chem. Soc. Japan. 1983; 56: 3847
40 田中孝等. 分析化学(日), 1981; 30: 131
41 Waki H and Korkisch. J. Talanta, 1983; 30: 95
42 冯 胜, 何雨甘. "中国有色金属分析情报网 1985 年光度分析会议论文摘要汇编", 71, 1985; 成都
43 闫永胜等. 理化检验(化), 1995; 31(5): 279
44 Yoshimura K et al, Talanta, 1978; 25: 579
45 刘少军, 汤福隆. 分析化学. 1984; 12(1): 64

表 14-16 凝胶相吸光光度法应用实例

待测元素	测定对象	显色剂	凝胶	测量波长(双波长) λ/nm	线性范围或测定下限	灵敏度提高倍数	文献
As	三氯化锑、聚硫酸铝、污水	砷锑钼蓝杂多酸	葡聚糖凝胶 G-50	$\lambda_1 725, \lambda_2 400$	(0～20)μg/50ml	—	1
Bi		HCl (50%异丙醇)	QAE-Sephadex A-25-Cl^-	$\lambda_1 328, \lambda_2 360$	$2.9\times10^{-8}mol \cdot L^{-1}$		2
Co	铜矿	BCO	明胶凝胶(冻胶)	$\lambda_1 610, \lambda_2 700$	(0～50)μg/50ml	—	3
P	天然水	钼酸盐	Sephadex G-25	$\lambda_1 836, \lambda_2 416$	$1.1\times10^{-7}mol \cdot L^{-1}$	32	4
Si	高纯水	钼酸盐	Sephadex G-25	$\lambda_1 805, \lambda_2 450$	$1.2\times10^{-7}mol \cdot L^{-1}$	37.5	5
U	合成试样	NH_4SCN	QAE Sephadex A-25-Cl^-	$\lambda_1 300, \lambda_2 600$	$3.9\times10^{-7}mol \cdot L^{-1}$	30	6

本表参考文献:

1 柯以侃等. 冶金分析, 1993; 13(1): 9
2 Yoshimura K. Waki H. Talanta. 1985; 32: 345
3 杨泉生等. 分析化学, 1987; 15(7): 652
4 Yoshimura. K et al. Anal. Chem. 1986; 58: 591
5 Yoshimura. K et al. Anal. Chem. 1984; 56(13): 2342
6 Waki H et al. Talanta. 1983; 30: 95

表 14-17 泡沫塑料相吸光光度法应用实例

待测元素	测定对象	显色剂	泡沫塑料中的萃取剂	测量方法及波长 λ/nm	线性范围/μg	提高灵敏度倍数	文献
Au	铜矿	TMK	MIBK	双波长法, $\lambda_1 547, \lambda_2 720$	0～1.5	2	1
Co	矿石	亚硝基红盐	三正辛胺-二甲苯	单波长法, λ520	0～10	—	2
Fe	地下水纯水	KSCN-1, 10 二氮菲	三正辛胺-二甲苯	双波长法, $\lambda_1 538, \lambda_2 700$	0～1.5 0～7	2	3

本表参考文献:

1 谢格波等. 分析化学, 1985; 13(5): 324
2 谢格波. 分析化学, 1984; 12(4): 294
3 谢格波, 张霖霖. 分析试验室, 1985; 4: 20

表 14-18 萘相吸光光度法应用实例

待测元素	测定对象	显色剂	显色条件	双波长测量 λ/nm	线性范围或测定下限	灵敏度提高倍数	文献
Fe(Ⅱ)	自来水	Phen-STPB	pH=4.5	$\lambda_1 570, \lambda_2 620$	(0～10)μg/20ml	10	1
Ni	水样	丁二酮肟	pH=9.0	$\lambda_1 550, \lambda_2 650$	(0～100)μg/50ml		2

本表参考文献:

1 万益群等. 分析试验室, 1995; 14(2): 29
2 彭在姜等. 分析试验室, 1996; 15(2): 40

第十一节 计量学吸光光度法

一、各种计量学计算方法简介

化学计量学（Chemometrics）是将数学和计算机科学应用于化学的一门新兴的交叉学科。在分析化学领域中，计量化学是应用数学和统计方法、用最佳方式获取关于物质系统的有关信息。有关化学计量学的内容国内已有专著介绍[192~200]。自从80年代以来化学计量学在光度分析中的应用研究在国内十分活跃，也有专著出版[201]。清华大学等四所高校联合编制了“计算机同时多成分光谱定量分析软件包”简称SPQA，包含了14种计算机光谱定量方法，不仅给出了每一种方法的计算程序，而且可进行14种方法的计算对比。

计量学吸光光度法是指应用化学计量学中的一些计算方法对吸光光度法测定数据进行数学处理后，同时得出所有共存组分各自的含量（或浓度）的一种计算吸光光度法，目前常用的一些计算方法包括最小二乘法、改进矩阵法、因子分析法、主成分回归、偏最小二乘法、岭回归、卡尔曼滤波法、线性规划法、人工神经网络等等。

计量学吸光光度法在近十多年来发展十分迅速，1991年11月在成都召开的我国首届现代光度分析学术会议更集中反映了计量学吸光光度法在我国的发展[202]。

（一）多组分光度分析模型

基于Beer定律与加和性原理，可建立多组分光度分析量测模型

$$b_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} c_j + V_i \quad (i = 1, 2, \cdots l) \tag{14-30}$$

式中，a_{ij}为组分j在波长点i上的吸光系数；b_i为混合物样品在波长i上的吸光度；c_j为组分j的浓度。

当$l=n$时，(14-30）式为常规方程组，可采用联立方程组解法[203~205]。当$l>n$时，(14-30）式为矛盾方程组，已提出了众多的解法。各种算法，各具特色。现简要介绍如下：

（二）多组分分析数据处理方法

1. 最小二乘法[206~208]

设有n个组分的混合物，在l个波长点（$l>n$）测定混合物的吸光度，可得超定线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}c_1 + a_{12}c_2 + \cdots + a_{1n}c_n = b_1 \\ a_{21}c_1 + a_{22}c_2 + \cdots + a_{2n}c_n = b_2 \\ \cdots\cdots \\ a_{l1}c_1 + a_{l2}c_2 + \cdots + a_{ln}c_n = b_l \end{cases} \tag{14-31}$$

其中，a_{ij}为组分j在波长点i上的吸光系数。可由测定纯组分标准溶液获得；c_j为组分j的浓度；b_i为混合物样品在波长点i上的吸光度。

上式用矩阵表示为

$$\boldsymbol{A}\bar{\boldsymbol{C}} = \boldsymbol{B} \tag{14-32}$$

利用最小二乘原理可得法方程组

$$\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{A}\bar{\boldsymbol{C}} = \boldsymbol{A}^T\boldsymbol{B} \tag{14-33}$$

利用全主元消去法或矩阵法求出c_j。

2. 改进矩阵法[209,210]

改进矩阵法的计算公式为

$$P=CB^T\ (BB^T)^{-1} \tag{14-34}$$

$$\bar{C}_{样}=P\ \bar{B}_{样} \tag{14-35}$$

上两式中标准混合样浓度矩阵 C 为

$$C=\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \cdots & & & \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix}$$

标准混合样吸光度矩阵 B 为

$$B=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \cdots & & & \\ b_{l1} & b_{l2} & \cdots & b_{lm} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

样品的吸光度矢量 $\bar{B}_{样}$ 为

$$\bar{B}_{样}=\begin{bmatrix} b_{样1} \\ b_{样2} \\ \vdots \\ b_{样l} \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中，n 为样品中组分数；m 为标准混合样组数；l 为测量波长点数。列矩阵 $\bar{C}_{样}$ 即为所求样品中各组分浓度。

3. 因子分析法

因子分析这一领域的工作国外开展较早[211]，86 年以后国内始有文献报道[212~217]。这里只扼要介绍目标因子分析法。

由实验测得 m 个样品的吸光度矩阵 B 为

$$B=AC \tag{14-36}$$

A、C 是分解 B 的行、列矩阵，令 Z 矩阵为 B 的协方差矩阵，即

$$Z=B^TB \tag{14-37}$$

式中 B^T 是 B 的转置矩阵则 Z 矩阵为 m 阶实对称矩阵（m 为所测样品数），必可找到 m 阶正交矩阵 Q 使得 Z 的相似矩阵 $Q^{-1}ZQ$ 为对角阵，其主对角线上的第 i 个元素就是 Z 的第 i 个特征值，Q 的第 i 列，就是 Z 的第 i 个特征向量（$i=1$，$2\cdots\cdots$，m）取 k 个较大的特征值 λ_i（k 为样品中的组分数）所对应的特征向量 Q_i 构成列矩阵 C，而 $A=BC^T$，C^T 是 C 的转置矩阵这就求得了"抽象的行、列矩阵 A，C。

给出一个由纯组分的吸收值构成的目标检测行矩阵 A^*，用下式求出变换矩阵 T，

$$T=(A^TA)^{-1}A^TA^* \tag{14-38}$$

用 $A\cdot T$ 作为对 A^* 的估计，若在误差允许范围内，即 $A\cdot T$ 与 A^* 无明显差异，则此时的 T 矩阵就是所求的变换矩阵，若 $A\cdot T$ 与 A^* 有明显差异，则以 $A\cdot T$ 代替 A^*，用上式继续迭代。

求出变换矩阵后，按下述公式求得 m 个样品中各组分浓度，

$$C_{样}=T^{-1}C \tag{14-39}$$

4. 主成分回归[218]

设 B 为 m 个校正样品在 l 个波长处的吸光度矩阵；C 为 n 个组分在 m 个校正样品中的浓

度矩阵；E 为残差矩阵；主成分回归法把吸光度矩阵分解为隐变量矩阵 T 与载荷矩阵 W 的乘积：

$$B_{m\times l}=T_{m\times d}W_{d\times l}+E_{m\times l} \tag{14-40}$$

式中 d 为最佳因子数（维数），用交叉证实法（Cross-Validation）确定。将含有吸光度矩阵 B 绝大部分信息的矩阵 T 与浓度矩阵 C 作线性回归：

$$C_{m\times n}=T_{m\times d}A_{d\times n} \tag{14-41}$$

用最小二乘法求解系数矩阵

$$A_{d\times n}=(T^TT)^{-1}T^TC=\Lambda^{-1}T^TC \tag{14-42}$$

Λ 为 BB^T 的 d 个较大特征值所组成的对角矩阵，Λ^{-1}实际上是 d 个特征值的倒数所构成的新对角矩阵。

对样品有：

$$\bar{C}_{样}=T_{样}A=\bar{B}_{样}W^TA \tag{14-43}$$

式中 $\bar{B}_{样}$是所测样品的吸光度矢量。

主成分回归可采用非线性迭代偏最小二乘（NIPALS）算法。

5. 偏最小二乘法

本法在分析中的应用国外始于 1983 年[219,220]，目前已有文献报道国内作者在这方面的工作[221,222]。

设 B 为 m 个校正样品在 l 个波长处的吸光度矩阵；C 为 n 个组分在 n 个校正样品中的浓度矩阵；E、F 分别为残差矩阵；偏最小二乘法不仅把光谱矩阵 B 分解为吸光度隐变量矩阵 T 与载荷矩阵 P 的乘积，还把浓度矩阵分解浓度隐变量矩阵 U 与载荷矩阵 Q 的乘积

$$B_{m\times l}=T_{m\times d}P_{d\times l}+E_{m\times l} \tag{14-44}$$

$$C_{m\times n}=U_{m\times d}Q_{d\times n}+F_{m\times n} \tag{14-45}$$

然后把隐变量矩阵 T、U 作线性回归，用对角矩阵 A 关联：

$$U_{m\times d}=T_{m\times d}A_{d\times d} \tag{14-46}$$

若预测样品的吸光度矢量为 $\bar{B}_{样}$，则：

$$\bar{B}_{样}=T_{样}P \tag{14-47}$$

由上式求出 $T_{样}$，则：

$$\bar{C}_{样}=T_{样}AQ \tag{14-48}$$

偏最小二乘法可采用 NIPALS 算法。

6. 岭回归[218]

在最小二乘法中已经给出样品中各组分的浓度估计值为

$$\hat{C}=(A^TA)^{-1}A^TB$$

当正规方程系数矩阵 $S=A^TA$ 接近退化时，用通常最小二乘法，浓度 C 接近不可估。

岭回归的基本思路是，当 S 的最小特征根接近于 0 时，$\|\hat{C}-C\|^2$ 很大（$\hat{C}$,C 分别为浓度估计值与直值），为克服这一缺点，用 $S+KI$ 代表 S，人为地将最小特征根由 $\min\lambda_i$ 变 $\min\lambda_i+K$，以减小均方误差。K 是可调参数，I 为单位矩阵。由于 K 的引入，岭回归失去了最小二乘回归所具有的无偏估计的特点，故称为有偏估计，其基本公式为

$$\hat{C}(K)=(A^TA+KI)^{-1}A^TB \tag{14-49}$$

K 的选择方法有十几种，可采用岭迹图法，因 $\hat{C}(K)$是 K 的函数，用 $\hat{C}(K)$对 K 作用。用

下式可方便计算出岭迹：

$$\hat{C}_{j-1}(K)=-\left[\sum_{i=1}^{m+1}x_{i1}x_{ij}/(\lambda_i+K)\right]/\sum_{i=1}^{m+1}[x_{i1}^2/(\lambda_i+K)](j=2,\cdots,m+1) \quad (14\text{-}50)$$

式中 x_{ij}为使 $U=\begin{vmatrix}B^TB & B^TA\\ A^TB & A^TA\end{vmatrix}$ 成为对角矩阵的正交阵 X 的元素；λ_i 为 U 阵的特征值。

7. 卡尔曼滤波法[223~229]

卡尔曼滤波递推公式解决扫描分光光度系统的具体形式如下：

C_k 的最佳线性滤波值 $\hat{C}_k$ 为

$$\hat{C}_k=\hat{C}_{k-1}+K_k(B_k-A_k\hat{C}_{k-1}) \quad (14\text{-}51)$$

式中，$\hat{C}_k$ 为第 k 次试样各组分浓度的新估计值；$\hat{C}_{k-1}$为对前 $k-1$ 次测量值计算得出 C 的估计值；B_k 为样品的吸光度值；A_k 为 $l\times n$ 阶吸光系数矩阵。K_k 表示卡尔曼滤波的增益矩阵

$$K_k=P_{k/k-1}A_k^T(A_kP_{k/k-1}A_k^T+R_k)^{-1} \quad (14\text{-}52)$$

式中，R_k 为仪器白噪声，为常数；$P_{k/k-1}$称为（一次）预测误差协方差阵，其值为

$$P_{k/k-1}=P_{k-1} \quad (14\text{-}53)$$

而误差协方差阵 P_k 为

$$P_k=(I-K_kA_k)P_{k/k-1}(I-K_kA_k)^T+K_kP_kK_k^T \quad (14\text{-}54)$$

卡尔曼滤波需预先知道 $\hat{C}_0$ 和 P_0，滤波前因不知道任何信息，故可定 $\hat{C}_0=0$. 而其初始误差协方差阵 $\boldsymbol{P}_0$ 为

$$\boldsymbol{P}_0=\begin{bmatrix}\sigma_1^2 & & 0\\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_n^2\end{bmatrix} \quad (14\text{-}55)$$

其中

$$\sigma_i=\alpha(R/C_i^2)^{1/2} \quad (14\text{-}56)$$

α 为和所选计算机精密有关常数，通常为 10～100 范围，R 在紫外中常取 $R=10^{-6}$，C_i 为第 i 组分在第一测定点的吸光度。

开始时 $k=1$，一直重复以上逆推计算至 l 次测量值计算完毕。

卡尔曼滤波解决问题的思路为：如对前 $k-1$ 次测量值计算得出 C 的估计值 $\hat{C}_{k-1}$后，每加进一次新的观测值 B_k 可用下式获得新估计值 $\hat{C}_k$：

新估计值＝旧估计值＋校正值

这样不论测量次数如何增加，就不需要象最小二乘法那样解高阶逆矩阵，又不需要存储大量测量数据，能实现实时处理。

8. 无约束优化方法[230]

以吸光度计算值和测量值之间偏差的平方和为最小为目标函数即

$$f(c)=\sum_{i=1}^{l}\left[\sum_{j=1}^{n}a_{ij}c_j-A_i\right]^2\to\min \quad (14\text{-}57)$$

并不带约束条件，这种无约束优化计算方法用于光度分析的常用的有：坐标轮换法[231~233]；Rosenbrock 法[231]和共轭梯度法[234]等。

坐标轮换法的基本思想是：先给定 c_1，c_2，…，c_n 一组初值，然后固定 c_2，c_3，…，c_n 不变，调节 c_1 使 $f(c)\to\min$；如此依次轮流调节各个变量，直至达到一定的精度为止。

9. 线性规划法[235]

何锡文等首先将线性规划法用于多组分测定[236]。

在组分数为 n，测量波长 λ_1，λ_2，……，λ_l 的总数为 l ($l \gg n$) 时的光度法测定中，约束条件为：

$$\left|\sum_{j=1}^{n} c_j a_{ij} - b_i\right| \leqslant E \qquad i = 1,2,\cdots,l; j = 1,2,\cdots,n \tag{14-58}$$

$$c_j \geqslant 0$$

目标函数为：

$$\max\left\{\left|\sum_{j=1}^{n} c_j a_{ij} - b_i\right|\right\} \rightarrow \min \tag{14-59}$$

式中，a_{ij}和 c_j 分别为 n 个组分在波长 λ_i 处的吸光系数和组分浓度；b_i 为混合物在 λ_i 处的总吸光度。现在的目标就是要确定一组 c_j 值，在所有波长位置，使这个绝对值的最大者为最小。因此，用已知各组分的吸光系数和混合物的总吸光度求各组分含量 c_j 的问题可表示为求向量 $W^T = (c_1, c_2, \cdots\cdots, c_n, E)$ 使得线性目标函数 S

$$S = E_{\min}$$

$$\left|\sum_{j=1}^{n} c_j a_{ij} - b_i\right| \leqslant E \qquad i=1,\ 2,\ \cdots,\ l;\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ n \tag{14-60}$$

$$c_j \geqslant 0$$

将上式化为其相当的对偶规划标准形式后，用单纯形法求解。

10. 人工神经元网络方法[237]

神经元是组成人脑的基本单元，相互连接组成网络，人工神经元网则是通过模拟人脑的神经网络来处理信息，目前较为实用的一种神经网络算法是反向传播算法（Back-propagation Method），神经网络分别由输入层、输出层以及反映研究对象非线性关系的隐含层构成。设前一层节点的输出值为 O_i，则节点 j 的输入值 net 为

$$net_j = \sum \omega_{ji} \cdot O_i \tag{14-61}$$

式中 ω_{ji}为前一层节点的各输出对应的权值。

神经网络的 δ 规则算法目标函数为

$$O_j = f(net_j) \tag{14-62}$$

式中 O_j——节点 j 的激励输出值；

f——节点的激励函数。

目标函数含有所有结点的可调节权重值，通过目标函数的优化，求解这些权值，使计算值与观测值间的误差达到最小。

目标函数求解过程为：输入大量样本，网络通过学习不断修正自己的各连接权值，使网络输出不断接近于给定期望值。修正权值的迭代公式是：

$$\Delta\omega_{ji}(n+1) = \eta \cdot \delta_j \cdot O_i + \alpha \cdot \Delta\omega_{ji}(n) \tag{14-63}$$

输出层
$$\delta_k = (T_k - O_k) \cdot O_k \cdot (1 - O_k) \tag{14-64}$$

隐含层
$$\delta_j = O_j \cdot (1 - O_j) \cdot \sum_k (\delta_k \cdot \omega_{kj}) \tag{14-65}$$

式中，T_k 是样本；η，α 是参数；η 是学习系数，可加快学习过程；α 是动量系数，有助于收敛；δ_j 为反向传播的递归项。目前，η 及 α 的选择尚凭经验进行。

每次迭代后检查单个样本的平方误差 E_p

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \sum (T_{pk} - O_{pk})^2 \tag{14-66}$$

观察 E_p 是否小于某一正小数 ϵ，小于则不再迭代；或者检查系统的均方差 E_t，

$$E_t = \frac{1}{2}P \cdot \sum_{p}^{k} \sum_{k} (T_{pk} - O_{pk})^2 \tag{14-67}$$

式中，P 是样本数；k 是输出层节点个数，观察 E_t 是否小于另一正小数 ε'，小于则不再迭代，否则继续，直至迭代次数达到指定最大迭代次数时退出。

二、计量学吸光光度法的应用

计量学吸光光度法近年得到广泛的重视，仅给了在有机药物分析中的部分应用实例，以供参考。

表14-19 计量学吸光光度法在有机药物分析中的应用实例

方法	被测组分	应用	文献
最小二乘法	SMPZ，TMP	复方片剂	1
	SMZ，TMP	复方新诺明片	2
	CPZ，IPZ	复方盐酸氯丙嗪	3
	A. P. C	A. P. C片剂	4，8
	苯酚，间苯二酚	复方涂剂	5
	$V_{B_{1,2,6}}$，烟酰胺	多种 V_B	6
逆最小二乘法	阿司匹林，非那西丁、咖啡因	复方乙酰水杨酸片	7
改进矩阵法（CPA）	安基比林，非那西丁，咖啡因，苯巴比妥 A. P. C		9,11,12 10
改进矩阵法（CPA）	盐酸异丙嗪，利眠宁，V_{B_1}，V_{B_6}，氢氯噻嗪，硫酸双肼肽嗪	复方降压片	13
	息喘灵片各组分	息喘灵片	14
	SD，SMZ，TMP	增效联磺片	15
因子分析法	SMPZ，TMP	复方片剂	16
	α-酮戊二酸，丙酮酸	转氨酶	17
	氯扑咖妥	去痛片	18
	磺胺甲氧吡嗪，扑热息痛	复方片剂	19
	磺胺嘧啶，磺胺胍	慈母欣片	20
	氨基酸	混合氨基酸	21
偏最小二乘	氨基比林、非那西丁、咖啡因、苯巴比妥	去痛片	22
	磺胺甲氧吡嗪、甲氧苄胺嘧啶	复方磺胺林片	23
	三组分	复方阿斯匹林	24
	扑热息痛、氨基比林、咖啡因	速效感冒片、咳喘感冒片	25
	土霉素	生物效价	26
非线性偏最小二乘	扑热息痛，咖啡因、扑尔敏、人工牛黄	速效伤风胶囊	27
	盐酸普鲁卡因、盐酸黄连素、尼泊金乙酯	沃古林眼药水	28
卡尔曼滤波法	朴阿加	复方片剂	29
	CPZ、IPZ	复方制剂	30
	苯酚、间苯二酚	复方涂剂	31 32、33
	$V_{B_{1,2,6}}$，烟酰胺	复合 V_B	34
	磺胺甲基异噁唑、磺胺嘧啶，甲氧苄氨嘧啶	增效联磺胶囊	35
	苯妥英纳	复方苯妥英纳片	36
	四组分	V_B 片	37
	咖啡因、苯甲酸钠	安钠咖注射液	38
	维生素 B_6、维生素 B_1 利眠宁，盐酸异丙嗪，硫酸双肼酞嗪，氢氯噻嗪	复方降压片	39
卡尔曼滤波法	扑热息痛，安替比林	复方扑热息痛针剂	40
	扑热息痛	速效伤风胶囊	41
	非那西汀，氨基比林，咖啡因	克感敏	42
	氯霉素，呋喃西林	滴耳液	43
	苯甲酸，水杨酸	复方苯甲酸醇溶液、复方苯甲酸软膏、三酸散、三酸软膏	44，47
	双氯灭痛	注射液	45
	苯甲酸、水杨酸、土荆皮	复方土荆皮酊	46
	SD、SMT、TMP	增效联磺片	48
	维生素 B_1，B_6，利眠宁氢氯噻嗪，硫酸肼酞嗪	复方降压片	49

本表参考文献：

1 胡育筑，缪建荣等．南京药学院学报，1984；15(3)：42
2 吴 桥，杨金玉等．南京药学院学报，1986；17(3)：201
3 相秉仁，徐建平等．南京药学院学报，1985；16(2)：33
4 程景才，安登魁等．南京药学院学报，1985；16(2)：74
5 相秉仁，路铭等．药物分析杂志，1985；5(4)：221
6 周其镇，殷龙彪等．药学学报，1987；22(12)：892
7 吴志平等．分析化学，1992；20(7)：794
8 殷龙彪，刘亦瑛．华东化工学院学报，1984；14(2)：204
9 殷龙彪，刘亦瑛．计算机与应用化学，1986；3(1)：43
10 殷龙彪，刘亦瑛．高等学校化学学报，1985；6(6)：502
11 殷龙彪，刘亦瑛．分析化学，1986；14(4)：307
12 陈幼亭等．中国药科大学学报，1989；(3)：172
13 徐建平等．药学学报，1989；(11)：853
14 梁祈等．中国药科大学学报，1992；23(2)：124
15 张守尧等．华西药学杂志，1994；9(4)：239
16 邱家学，罗国安等．药学学报，1988，23(2)：142
17 李通化．分析化学，1987；15(10)：887
18 安登魁．中国科学院．化学学会，"第八届国际计算机在化学研究与教育中应用会议"，北京，1987
19 邱家学等．药学学报，1988；(2)：142
20 刘贵银等．中国药学杂志，1990；25(8)：476
21 刘信安等．分析化学，1991；19(7)：826
22 谢玉珑等．分析化学，1989；(7)：588
23 罗国安等．中国药科大学学报，1988；(2)：104
24 罗国安等．药学学报，1989；(9)：684
25 刘家宝等．分析化学，1990；18(10)：887
26 徐 芬等．药学学报，1994；29(4)：767
27 肖 华等．中国医院药学杂志，1995；15(1)：72
28 郭寅龙等．中国药科大学学报，1991；22(6)：350
29 王义明，杨敏来等．南京药学院学报，1986；17(4)：270
30 刘一鸣，俞汝勤．药学学报，1987；22(12)：913
31 李志良，刘一鸣．高等学校化学学报，1989；10(6)：575
32 石乐明，刘信安．高等学校化学学报，1988；4(4)：16
33 刘信安，林爱华等．中国科技大学学报，1988；18(4)：539
34 冯 芳，相秉仁等．药学学报，1989；23(5)：376
35 王占文等．中国药学杂志，1989；(11)：667
36 徐建平等．中国药科大学学报，1989；(1)：18
37 杨战庆．药物分析杂志，1989；(6)：369
38 张 瑾等．药学学报，1988；(9)：711
39 徐建平等．药学学报，1990；25(1)：77
40 相秉仁等．中国药科大学学报，1991；22(2)：80
41 李 亮等．药物分析杂志，1990；10(1)：17
42 李 亮等．中国药科大学学报，1990；21(4)：208
43 张贞良等．药物分析杂志，1991；11(2)：100
44 蒋万银等．药物分析杂志，1992；12(1)：35
45 蒋万银等．中国药学杂志，1994；29(3)：159
46 黄信源等．中国药学杂志，1994；29(7)：620
47 李 华等．分析化学，1994；22(8)：862
48 肖 华等．中国医院药学杂志，1995；15(1)：72
49 葛 伦等．中国医药工业杂志，1995；26(3)：124

参 考 文 献

1 罗庆尧，邓延倬等编著．分光光度分析，北京：科学出版社，1992
2 陈国珍，黄贤智等编著．紫外-可见光分光光度法，北京：原子能出版社，1983
3 Kortüm G，Von Halban H．Z Physik．Chem，1934；A170：212
4 Kortüm G，Angew Chem，1937：50：193
5 Ringbom A．Z Anal Chem，1939；115：402
6 Ringbom A．Sundman F．ibib，1939；116：104
7 Hiskey C F．Anal Chem，1949；21：1440
8 Reilley C N Crawford C M．Anal Chem，1955；27：716
9 Sevhla G．Talanta，1966；13：64
10 管宗颍．理化检验（化），1983；19(4)：5
11 管宗颍．理化检验（化），1985；21(1)：54
12 管宗颍．分析测试通报，1987；6(2)：71；6(3)：69；6(4)：67；6(5)：65；6(6)：45
13 管宗颍．分析化学，1988；16(10)：942
14 杜治坤，柏素卿．理化检验（化），1980：16(4)：5
15 田笠卿．化学通报，1963；(5)：45
16 Crawford C M．Anal Chem，1959；31：343
17 Skoog D A，West D M．Principles of Instrumental Analysis．Second Edition，Saunders College/Holt Rinehart and Winston，1980；194～197
18 顾靖飞．高等学校化学学报，1989；10(4)：351
19 湖南冶金研究所，浙江新安江分析仪器厂．理化检验（化），1984；20(1)：59
20 Bastion R．Anal Chem，1953；25：259
21 陈芳泉，刘近庚．分析试验室，1990；9(2)：45
22 顾清飞．地质实验室，1989；5(1)：59
23 叶长龄．山东大学学报（自），1964；(3)：53
24 杨素卿，杜治坤等．湖南冶金，1978；(1～2)：143
25 Chance B Rev Sci Instr，1951；22：634
26 Butter W L et al．Proc Natl Acad Sci，1959；45：1703
27 Shibata S et al．Anal Chim Acta，1969；46；271
28 柴田正三，古川正道．分析化学（日），1974；23；1545
29 Shibata S．Angew Chem，1976；88：750
30 柴田正三，酒井馨，长谷川敬彦编．二波长分光光度法とその应用．讲谈社，サイエンテイフイク，1979
31 本川忠，黑石忠文等．Hitachi Instrument News，1968；11：590
32 厦门大学化学系分析化学教研室．分析化学，1978；6(3)：224

33 黄尊波，赵祥大等．中华医学检验杂志，1981；4(3)：185
34 曹雨震，药学通报，1981；16(12)：751
35 过乃蓉，罗庆尧等．冶金分析，1982；(4)：50
36 杨泉生．分析试验室，1983；(4)：43
37 杨泉生．地质实验室，1986；2(3)：194
38 杨泉生．地质地球化学，1986；(7)：63
39 杨泉生．江西冶金，1987；(6)：38
40 王淑仁，徐广仁，买光昕编著．双波长分光光度法．山东：山东科学技术出版社，1986
41 杨泉生，聂基兰编著．双波长分光光度法的原理与应用．北京：化学工业出版社，1991
42 吴家齐，李滨等．分析化学．1985；13(2)：132
43 倪其道，吴家齐等．分析化学．1987；15(5)：418
44 陆晓华，绍元．分析化学，1989；17(8)：717
45 市川哲生，福间俊明．岛津评论．1983；40(2－3)：17
46 孙丕均．冶金分析，1986；6(3)：53
47 冀长生，李金和等．化学学报，1987；45(9)：860
48 张国夫，王中川．分析化学，1980；8(3)：292
49 杨吉祥，杨泉生．分析试验室，1984；2：57
50 李碧云，王艳霞．分析化学，1982；10(6)：351
51 Keihei Ueno et al. Anal Chim Acta，1979；105：289
52 姜心如，徐永明等．南京药学院学报，1984；15(3)：32
53 Li Kuang-Pang and John Arrington. Anal Chem，1979；51：287
54 Lindberg A O. Anal Chim Acta，1978；96：319
55 柴田正三．分析试验室（专辑），1982；5：85
56 杨泉生．理化检验，1983；19(1)：20
57 Shibata S et al. Anal Chim Acta，1975；78：487
58 曾胜年，龚汝秀等．理化检验，1982；18(5)：8
59 杨泉生，黄坚锋．分析化学，1982；10(3)：167
60 杨泉生，黄坚锋．分析化学，1980；8(5)：460
61 Watanabe H et al. Talanta，1979；26：959
62 杨泉生，陈　洪．分析化学，1984；12(12)：1098
63 杨泉生，陈国辉等．分析化学，1985；13(11)：864
64 黄坚锋，杨泉生．江西大学学报，1980；4(2)：81
65 杨泉生，简金生．稀有金属，1985；4(3)：67
66 罗建波，分析试验室，1985；4(4)：53
67 Ratzlaff K L Natusch D F S. Anal Chem，1977；49：2170
68 Ratzlaff K L Darus H bin. Anal Chem，1979；51：256
69 Ratzlaff K L S Natusch D F. Anal Chem，1979；51(8)：1209
70 Ingle J D et al. Anal Chem，1972；44：1375
71 Ingle J D et al. Anal Chem，1972；44：785
72 Ingle J D. Anal Chem，1973；45：861
73 Rothman C. D et al. Anal Chem，1975；47：1226
74 巢荣巍，崔树花．分析化学，1984；12(9)：814
75 倪永年，杨泉生．分析化学，1986；14(4)：250
76 倪永年，杨泉生．分析化学，1987；15(12)：1110
77 潘承荣．分析化学，1983；11(3)：218
78 黄贤智，许金钩．光学和光谱技术，1982；(3)：37
79 何照花．生物化学与生物物理进展，1981；(1)：70
80 张时行，万邦莉．药学学报，1985；20(4)：301
81 徐广仁，杨增光等．化学通报，1985；(8)：23
82 杨克壤．化学通报，1983；(3)：24
83 黄坚锋，杨泉生．理化检验（化），1981；17(2)：11
84 邹寅阳．分析仪器，1981；(3)：81
85 过乃蓉，罗庆尧等．分析化学，1983；11(6)：408
86 张汉儒．药物分析化学杂志，1985；5(2)：92
87 岛津评论，1980；37(4)：1
88 Ashton G C et al. Analyst，1956；81：225
89 Glenn A L J Pharm Pharmcol，1963；15：1237
90 Abdine H et al. J Pharm Pharmcol，1972；24：518
91 Wahbi A. M et al. Ibid，1974；26：317
92 罗国安，邱家学等编著．可见紫外定量分析及微机应用．上海：上海科学技术文献出版社，1988
93 Hager R N Anal Chem，1973；45：1131A
94 Hager R N et al. J Opt Soc Am，1970；60：1444
95 O'Haver T C et al. Anal Chem，1979；51 (1)：91A

96 Shibata S, Furukawa M et al. Anal Chim Acta. 1973; 65: 49
97 柴田正三, 古川正道. 分析化学（日）, 1974; 23; 1545
98 古川正道, 柴田正三. ふんせき, 1980; 9: 608
99 吴乾文, 齐大勇等. 分析仪器, 1983; (4):71
100 石井一, 高昌英. 日本化学會誌, 1980; 97(1):203
101 Gams P. Anal Proc. 1982; 19(1):33
102 秦建侯, 许慧卿. 分析仪器, 1983; (2):46
103 Savitzky A and Golay M. Anal Chem. 1964; 36; 1627
104 Lewis D. J. Chem Phys, 1970, 53: 2750 Matsui A. Tomicka K. J. Phys. Chem. 1976; 9: 529
105 Kandrnál J, Lipus V. Huvar B. Chem Listy, 1983, 77: 95
106 Heidecke G, Kropf J, Stock G. Z Anal Chem. 1983; 316: 405
107 Kitamura K, Morita E, Hozumi K. Yakugaku Zasshi, 1985; 105: 161
108 Gartzke J, Nolte K, Berka K. Jena Rev. 1984; 4: 170
109 Schuresko D D, Hawthorne A R, Vo-Dinh, T et al. Energy Res. Abstr, 1984; 9: 3269
110 Ichikawa T, Terada H. Yakugaku Zasshi, 1983; 103: 878
111 Bonfiglioli G, Provetto P. Appl Opt, 1964; 3: 1417
112 Milano M J, Pardue H L. Cook T E. Anal Chem, 1974; 46: 374
113 Milano M J, Pardue H L. ibid, 1975; 47: 25
114 French, F S, Church A B, Eppley R W. Carnegie Inst. Washington Yearbk, 1945; 53: 182.
115 Asrmu F, Rucci A. Rev. Sci. Instrum. 1966; 37; 1696
116 Baslev I. Phys. Rev. 1966; 143: 636
117 Cook, T E, Pardue H L, Santini R E. Anal Chem, 1976; 48: 451
118 Cook, T. E. Santini R. E. Pardue, H. L. ibid, 1977; 49: 871
119 Grieble D L, Olson M L, Jeffrey N P et al. Appl Spectrosc, 1980; 34: 56
120 French. C. S. Proc Instrum Soc Am, 1957; 8: 83
121 Saidel L J. Arch Biochem Biophys, 1970; 54: 185
122 Shibata S. Angew. Chem, 1976; 88: 750
123 Dubrovkin I M. Probl Anal Khim. (1989); 9: 50
124 Dubrovkin I M, Lozovitskii A S, Velikov V G. Zavod Lab, (1988); 54: 19
125 Kitamura K, Hozumi K. Anal Chim Acta, (1987); 201: 301
126 Ryan-Hotchkiss M, Ingle J D. Talanta, (1987); 34: 619
127 Brett, L, Kalsi A, Cummins S, Thombs D. Anal Proc. (1991); 28: 224
128 Craven P G, Fainhurst S A, Sutcliffe. L H. Spectrochim. Acta. A. (1988); 44; 539
129 Hammond V J, Price W C. J Opt Soc Am. 1953, 43; 924
130 Morrison J D. J. Chem. Phys, 1953; 21: 1767
131 Giese A T, French C S. Appl. Spectrosc, 1955; 9: 78
132 Fell A F, Smith A. Anal. Proc, 1982; 19 (1): 28
133 市川哲生. 岛津評論. 1980; 37(1):55
134 Taisky G. Angew Chem, 1978; 94: 840
135 Schmitt A. Tech. Lab, 1978; 5: 1207
136 Chadburn B P. Anal. Proc, 1982; 19: 42
137 Cottrell C T. ibid. 1982; 19: 43
138 Motokawa T. Nihacho Bunto Kodoho to Sono Oyo. 1979: 176
139 Furukawa M, and Shibata S. Bunseki, 1980: 608
140 Botter D. Instrum. News, 1975; 25: 14
141 O'Haver T C. Anal. Chem, 1979; 51: 91A
142 Talsky G. GIT Fachz. Lab, 1982; 26: 929
143 Miller J N, Ahmad T A, Fell A F. Anal Proc. 1982; 19: 37
144 Hager R N. Anal. Chem, 1973; 45: 1131A
145 Wahbi A. M. Anal Chinl Acta, 1974; 70 (1): 57
146 Shibata S et al. Anal Chim Acta, 1976, 81: 206
147 王保宁. 分析化学, 1983; 11(2):149
148 O'Haver T C et al. Anal, Chem, 1976; 48 (2:) 312
149 Morelli B. Analyst, 1988; 113 (7): 1077
150 Morelli B. Anal Lett, 1988; 21 (5): 759
151 吴茂樵, 刘瑜桢等. 分析化学, 1990; 18(7):683
152 Defruncesco F, Seppi A. Riv Soc Ital Sci Aliment, 1979; 8 (2): 111
153 任 英, 刘卓璟等. 分析化学, 1985; 13(1):6
154 徐嘉凉, 于如嫒. 药物分析杂志, 1984; 4(2):124
155 李金和, 奚长生等. 分析化学, 1989; 17(3):217
156 Hajime I, Katsuhiko S. Z Anal Chem, 1982; 312: 114
157 张宗仁, 娄 玉. 中国药学杂志 1989; 24(10):609
158 O'Haver T C. Anal, Proc, 1982; 19 (1): 22

159 Park M K. Cho J H. Arch Pharmacol Res. 1987; 10: 1
160 Talsky G. Z Fresenius, Anal Chem, 1989; 333: 702
161 Kvaratskheli Y K. Zh Anal Khim, 1983; 38 (8): 1427
162 Kimbrell S M, Booksh K and Stolzberg R. J Appl Spectrosc., 1992; 46: 704
163 I Dol, M Knochen and C Altesor, Analyst, 116 1991; 69
164 Grizodub A I, Asmolova N N, Levin M G. Georgievskii. V. P. Zh. Anal. Khim. 1988; 43: 2170
165 Juhl L L and Kalivas J H. Anal. Chim. Acta. 1988; 207: 125
166 孙若诚. 稀有金属, 1984; (1):56
167 吴家齐, 梁荣馥等. 地质实验, 1985; 1(2):108
168 陈 璞, 罗庆尧等. 光谱学与光谱分析, 1985; 5(2):5
169 Smith' R C. Rev Sci Instrum, 1963; 34: 296
170 李建军等. 高等学校化学学报, 1988; 9(4):337
171 Barker B F and Foz M F. Chem. Soc. Rev. 1980; 9: 143
172 Maddams W F. Appl. Spectrosc, 1980, 34: 245
173 Chen P, Qingyao L and Zeng Y. Guanpuxue Yu Guangpu Fenxi. 1985; 5: 5
174 O'Haver T C, and Green G L. Anal. Chem, 1976; 48: 312
175 Griffiths T R, King, K Hubbard et al J. Anal. Chim. Acta. 1982; 143: 163
176 Morrey J R. Anal. Chem. 1968; 40: 905
177 任 英. 分析试验室, 1984; 5: 8
178 柴田正三, 古川正道. Hitachi Sci Instr News, 1969; 12: 680
179 Mark H B et al. Kinetics in Analytical Chemistry. Interscience, New York; 1968
180 陈四箴. 分析化学, 1978; 6(1):42
181 陈丹华等. 分析试验室, 1984; 5: 74
182 阮大文. 分析试验室, 1987; 5(11):52
183 阮大文. 分析试验室, 1987; 5(12):50
184 Růžička J, HANSEN E H. 流动注射分析. 北京: 北京大学出版社, 1991
185 Baarson R E et al. Precipitate Flotation, a New Metal Extraction and Concentration Technique. 1963
186 Sebba F. Nature, 1959; 184: 1062
187 Sebba F. Ion Flotation. Elsevier, Amsterdam: 1962
188 董慧茹. 分析仪器, 1988; (3): 74
189 董慧茹, 乐秀毓. 化学通报, 1987; (2): 1
190 董慧茹, 董吉源. 中国环境监测, 1995; 11 (6): 50
191 杨泉生, 聂基兰. 双波长分光光度法的原理与应用. 北京: 化学工业出版社, 1992; 229 页
192 胡鑫尧, 孙杨名, 王心枢. 计算机在分析化学中的应用. 北京: 清华大学出版社, 1983
193 陈念贻等. 计算化学. 上海: 上海科技出版社, 1985
194 乔新泉. 计算机在化学中的应用. 南京: 南京大学出版社. 1986
195 赵新娜, 罗重庆. 数值方法及其在分析化学中的应用. 南昌: 中南工业大学出版社. 1987
196 俞汝勤. 现代分析化学中的信息理论基础. 长沙: 湖南大学出版社, 1987
197 俞汝勤. 化学计量学导论. 长沙: 湖南教育出版社. 1991
198 潘忠孝等. 化学因子分析. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1992
199 许禄. 化学计量学方法. 北京: 科学出版社. 1995
200 俞斌. 计算机化学. 北京: 化学工业出版社. 1995
201 罗国安等. 可见紫外定量分析及微机应用. 上海: 上海科学技术文献出版社. 1988
202 方国桢主编. 全国首届现代光度分析学术会议论文集. 成都: 四川大学出版社. 1991
203 张懋森. 化学世界. 1958, 13: 21
204 陈国珍, 赵九章. 化学学报. 1981, 39(增刊):120
205 周天泽, 慈云祥. 化学试剂. 1982, 4(3):182
206 Sternberg. J C. Anal Chem 1960; 32 (1): 84
207 Haland D M et al. Appl Spectrosc, 1985; 39
208 刘钦圣. 最小二乘问题计算方法. 北京: 北京工业大学出版社. 1989
209 Brown C W, Lynch P F, Obremski R J et al. Anal Chem, 1982; 54 (9): 2111
210 王保宁, 颜 涛. 分析化学, 1986; 14(3):182
211 Malinowski E R, Howery D G. Factor Analysis in Chemistry, New York: Wiley-Interscience, 1980
212 何锡文, 李 洪, 史慧明. 分析化学, 1986; 14(1):34
213 何锡文, 任洪吉, 史慧明. 分析化学, 1987; 15(4):372
214 李 科, 陶 亢, 王宗明. 光谱学与光谱分析, 1986; 6(2):48
215 何锡文, 任洪吉, 史慧明等. 分析化学, 1987; 15(6):495
216 刘一鸣, 俞汝勤. 高等学校化学学报, 1987; 8(5):413
217 李通化. 分析化学, 1987; 15(10):887
218 陈希孺, 王松桂. 近代实用回归分析. 桂林: 广西人民出版社, 1984
219 Lindberg W et al. Anal Chem, 1983; 55: 643
220 Geladi P, Kowalski B R. Anal Chim Acta, 1986; 185: 1
221 谢玉珑, 梁逸曾, 俞汝勤. 分析化学, 1989; 17(6):493

222 王镇浦，周国华，罗国安等. 分析化学，1989；17(4):317
223 Jazwinski A H. Stochastic Processes, Filtering theory. Acudemic Press，1970
224 Brown S D. Anal Chim Acta，1986；181：1
225 Rutan S C. J Chemom，1987；1：7
226 石乐明，李志良. 环境科学，1988；9(6):56
227 王义明，杨敬荣，董善士等. 南京药学院学报，1986；17(4):270
228 刘一鸣，俞汝勤. 药学学报，1987；22(12):913
229 李志良，刘一鸣，俞汝勤. 高等学校化学学报，1989；10(6):575
230 范鸣玉，张 莹. 最优化技术基础. 清华大学出版社，1982
231 Himmelblau D M. Applied Nonlinear Programming. McGraw-Hill Book Co，1972
232 康剑石，张懋森. 高等学校化学学报，1983；4(3):299
233 殷龙彪，刘亦瑛. 高等学校化学学报，1984；5(1):34；1986；14(4):357
234 石乐明，李志良. 青年化学，1987；2(1):48
235 Minoux M. Mathematical Programming，John Wiley and Sons，1986
236 何锡文，张大千. 分析化学，1979；7(3):299
237 Long J R et al. Anal Chem，1990；62：1791

第十五章　有机显色剂

第一节　概　　述

在进行吸光光度分析时，通常需要利用显色反应把待测组分转变成有色化合物，然后进行光度测定。我们将把待测组分转变成有色化合物的反应叫显色反应。与待测组分形成有色化合物的试剂称为显色剂，显色剂一般分为无机显色剂和有机显色剂两大类。常用的无机显色剂有硫氰酸盐、钼酸盐、过氧化氢、卤素离子等。有机显色剂的种类和数量均大大超过无机显色剂，在反应的灵敏性和选择性方面也都优于无机显色剂，故有机显色剂是显色反应的基础。光度分析之所以至今仍长盛不衰，在很大程度上和高灵敏度、高选择性的有机显色剂的发展紧密相关，本章着重介绍有机显色剂。

一、显色剂的选择

在吸光光度分析时，究竟选用何种显色剂较为适宜，一般从以下几种因素考虑[1]。

1. 灵敏度高

当测定微量组分时，选择灵敏度高的显色剂是考虑的主要方面，表示显色反应灵敏度的方法有摩尔吸光系数 ε、比吸收系数 $E_{1cm}^{1\%}$和桑德尔（Sandell）指数 S。S 值表示用 1cm 吸收池测得吸光度为 0.001 时，每毫升溶液中待测物的量（μg），以 $\mu g \cdot cm^{-2}$表示。S 和 ε 的关系为 $S=F/\varepsilon$，式中 F 表示待测物式量。一般认为 $\varepsilon>10^5$ 的显色反应是超高灵敏度，$\varepsilon=(6\sim10)\times10^4$ 是高灵敏度，$\varepsilon=(2\sim6)\times10^4$ 是中等灵敏度，而 $\varepsilon<2\times10^4$ 是低灵敏度。

影响摩尔吸光系数的主要因素有：①吸收谱带半宽度 $\Delta\nu_{1/2}$　$\Delta\nu_{1/2}$愈小，ε_{max}就愈大；②跃迁几率和分子截面积　电子跃迁几率取决于选择定则，遵守选择定则的跃迁几率大，ε_{max}也大，反之则 ε_{max}小。电子跃迁几率还与轨道空间性质有关，其重叠程度越大，跃迁几率大，ε_{max}也大。增大有色化合物分子的有效截面积，可显著提高 ε_{max}。

2. 选择性好

仅与一个组分或少数几个组分发生显色反应的显色剂是选择性好的显色剂，可允许共存的其他组分的种类愈多，相对浓度愈大，其选择性愈高。在一定条件下仅与一种组分反应，这种试剂称专属试剂或特效试剂。

3. 显色剂在测定波长处无明显吸收

通常把两种有色物质最大吸收波长之差称为“对比度”，一般要求显示剂与有色化合物的对比度 $\Delta\lambda$ 在 60nm 以上。这样试剂空白值小，可提高测定准确度。

4. 组成恒定，化学性质稳定

若有色化合物组成恒定，化学性质稳定，这样在测定过程中可使吸光度基本保持不变，提高测定的准确度和重现性。

二、显色剂的发展概况

显色剂的应用至今已有 200 多年的历史，到本世纪 50 年代前后显色剂的发展达到高峰。

相继出版了一些名著如 Fritz Feigl 的 “Spot Tests”、“Chemistry of Specific, Selective and Sensitive Reactions” 和 Frank Welcher 的 “Organic Analytical Reagents” 等。虽近几十年来仪器分析得到了广泛应用，取代了许多常用的可见分光光度分析法，但显色剂的应用仍在继续发展，自本书第一版出版以来又有不少有关显色剂的专著问世，其中有：

①程广禄等著的《Handbook of Organic Analytical Reagents》，第一版的中译本在 1985 年由地质出版社出版，该书的第二版在 1991 年出版，这是自 Welcher 主编的著名四卷集《有机分析试剂》1947 年问世以来又一本较著名的专著。

②曾云鹗等编著的《现代化学试剂手册·（第四分册）无机离子显色剂》，1989 年由化学工业出版社出版。

③张孙玮等编著的《有机试剂在分析化学中的应用》，1981 年由科学出版社出版。

④Z. 霍耳兹贝赫等著的《无机分析中的有机试剂手册》，中译本在 1983 年由高等教育出版社出版。

有机结构理论，有机合成理论和配位化学理论的发展促进了显色剂的研究，利用量子化学方法研究显色剂从分子水平揭示了有机试剂与金属离子作用的实质，由定性探讨向半定量过渡，应用从头算的非经验方法或半经验分子轨道理论方法，从分子的整体结构出发，计算分子中各原子的电子密度、能级、键级、自由价和吸收光谱特征，确定试剂存在形式及结构，从而对拟合成的显色剂和金属离子的反应作出估计。另一方面在已有实验基础上对已有种类试剂的合理改造，从而合成新的有机显色剂仍然是在以后相当一段时间内的研究方法[2]。近年来我国在有机显色剂的研制工作中取得了显著的成绩，主要有：①变色酸双偶氮类显色剂，②杂环偶氮和重氮氨基偶氮苯类，③苯基荧光酮类，④卟啉类，⑤冠醚类和⑥水溶性高分子显色剂等。

我国近十多年显色剂合成的有关文献可参阅分析试验室从 1987 年开始的关于光度分析的综论文章[3~8]。

第二节　常用有机显色剂

本节挑选了 21 类 140 多种有机显色剂[9]，给出了名称、结构式、分子式、相对分子质量、离解常数、性质及主要测定元素。

表 15-2 所列显色剂按母体结构或特征基团分类，各类显色剂及其所包含的化合物编号如表 15-1 所示。

表 15-1　常用有机显色剂分类及其编号表

序号	有机显色剂类别	显色剂编号	序号	有机显色剂类别	显色剂编号
1	变色酸偶氮化合物	1-1～1-8	12	席夫碱类试剂	12-1～12-5
2	吡啶偶氮类化合物	2-1～2-9	13	酚、芳胺类化合物	13-1～13-7
3	噻唑偶氮类化合物	3-1～3-4	14	三苯甲烷类酸性染料	14-1～14-19
4	其他偶氮类化合物	4-1～4-11	15	阳离子染料	15-1～15-10
5	氧肟酸和肟类化合物	5-1～5-5	16	含硫化合物	16-1～16-9
6	菲罗啉、联吡啶、联喹啉类化合物	6-1～6-11	17	β-二酮类化合物	17-1～17-3
7	安替比林类化合物	7-1～7-6	18	黄酮类化合物	18-1～18-4
8	羟基蒽醌类化合物	8-1～8-3	19	冠醚和穴醚	19-1～19-9
9	甲臜、肼、脲类化合物	9-1～9-4	20	卟啉	20-1～20-7
10	含亚硝基化合物	10-1～10-5	21	其他	21-1～21-3
11	8-羟基喹啉类化合物	11-1～11-3			

表 15-2 吸光光度法中常用有机显色剂

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
1-1	偶氮胂Ⅰ;新钍试剂;铀试剂Ⅰ　592.29 HO OH H_2O_3As —N═N— HO_3S　SO_3H	(I=0.1,20℃) H_6L　H_5L^- 0.6　0.8 H_4L^{2-}　H_3L^{3-} 3.5　8.2 H_2L^{4-}　HL^{5-} 11.6　15	通常为二钠盐,呈暗红色晶形粉末,溶于水,pH=1～8呈红色,微溶于乙醇,不溶于乙醚、三氯甲烷和四氯化碳等一般有机溶剂	U,稀土,Th,Ca,Sr
1-2	偶氮氯膦Ⅰ　592.92 PO_3H_2　HO OH Cl—　—N═N—　·$3H_2O$ HO_3S　SO_3H		暗红色粉末,易溶于水,呈亮红色;微溶于乙醇,不溶于乙醚、三氯甲烷等非极性有机溶剂	Mg,Y
1-3	酸性铬黑蓝　440.40 HO　HO OH —N═N— HO_3S　SO_3H	H_3L^{2-}　H_2L^{3-} 7.56　9.30 HL^{4-} 12.4	暗紫红色粉末,溶于水呈红色,稍溶于乙醇,碱性中呈紫色	Ca,Sr,Ba,Zn
1-4	偶氮胂Ⅲ　776.37 AsO_3H_2　HO　OH　H_2O_3As —N═N—　—N—N— HO_3S　SO_3H	H_8L　0.8 H_4L^{4-}　7.0 H_7L^-　2.9 H_3L^{5-}　8.4 H_6L^{2-}　3.5 H_2L^{6}　10.2 H_5L^{3-}　5.0 HL^{7-}　12.4	游离酸或一钠盐、二钠盐通常为暗红紫色粉末,溶于水或稀酸,较易溶于碱性溶液,难溶于普通有机溶剂,固体及水溶液长期稳定	Pb,U(Ⅵ)稀土,Ca,Zr,Bi,Hf,Th
1-5	偶氮氯膦Ⅲ　827.40 PO_3H_2　HO　OH　H_2O_3P Cl—　—N═N—　—N═N—　—Cl　·$4H_2O$ HO_3S　SO_3H	H_8L　H_7L^- 0.6　0.8 H_6L^{2-}　H_5L^{3-} 1.5　2.5 H_4L^{4-}　H_3L^{5-} 5.5　7.2 H_2L^{6-}　HL^{7-} 12.2　15.1 I=0.1 20℃	暗紫色结晶粉末,通常含有4分子结晶水,易溶于水,稍溶于乙醇和丙酮,不溶于苯、三氯甲烷、四氯化碳和乙醚等,但溶于正丁醇	稀土,Th,U,Ca,Mg,Zr
1-6	偶氮氯膦-mA　757.05 PO_3H_2　HO　OH　$COCH_3$ Cl—　—N═N—　—N═N—　·$4H_2O$ HO_3S　SO_3H	H_6L　H_5L^- 0.39　1.12 H_4L^{2-}　H_3L^{3-} 2.74　6.79 H_2L^{4-} 9.73 HL^{5-} 11.46(光度法)	暗紫色固体粉末,溶于水呈紫红色,不溶于乙醚、丙酮等一般有机溶剂	稀土,U,Mg
1-7	偶氮磺Ⅲ　760.63 SO_3H　HO　OH　HO_3S —N═N—　—N═N— HO_3S　SO_3H	H_8L^{2+}　H_7L^+ −2.0　0.3 H_6L　H_5L^- 0.9　1.9 H_4L^{2-}　H_3L^{3-} 2.3　2.7 H_2L^{4-}　HL^{5-} 11.7　14.5	暗紫色具有金属光泽的粉末,溶于水、水-乙醇溶液,不溶于苯、四氯化碳、乙醚和三氯甲烷等	Ba

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(pK)	性质	测定元素
1-8	对二硝基偶氮磺Ⅲ	778.62	H_8L^{2+} H_7L^{+} −2.3 0.3 H_6L H_5L^{-} 0.7 1.8 H_4L^{2-} H_3L^{3-} 2.1 2.6 H_2L^{4-} H_6L^{6-} 9.7 14.5	具有青铜色泽的暗紫色结晶粉末，易溶于水，水溶液长期稳定，不溶于丙酮、乙醇、乙醚和苯	Sr(Ba盐中)
2-1	吡啶偶氮萘酚，PAN	249.27	(I=0.1,室温) H_2L^+ 2.9 HL 11.6	橙红色或橙黄色结晶，熔点(140～142)℃，不溶于水，适当溶于强酸中，溶于碱溶液和乙醇、乙醚、三氯甲烷等一般有机溶剂，固体在棕色瓶稳定多年	Al,Sb(Ⅲ)Cd,Zn,Co,Cu,Ga,In,Fe,Pd,Sn,U,Rh,Ir
2-2	4-(2-吡啶偶氮)-1-萘酚 p-PAN	249.27	(I=0.1,光度法) H_2L^+ 3.0 HL 9.1	砖红色结晶，熔点127℃。易溶于乙醇、丙酮、甲醇、2-丙醇、二氯甲烷、二氧六环、苯和四氯化碳等，不溶于水和稀碱溶液	In,Pd等
2-3	2-(2-吡啶偶氮)-1-萘酚，α-PAN	249.27	(I=0.1,30℃) H_2L^+ 1.87 HL 10.37	红棕色结晶，熔点128℃，不溶于水，易溶于苯、四氯化碳，二氧六环等有机溶剂	Cu,Co,Ni等(萃取光度)
2-4	1-(2-吡啶偶氮)-2-萘酚-x-磺酸(x=6,7,8)	329.33	(I=0.1,25℃,水) H_2L HL^- PAN-6S 2.82 10.45 PAN-7S 3.12 10.55 PAN-8S 4.55 12.5	橙色结晶，熔点大于300℃，溶于水，微溶于乙醇，不溶于三氯甲烷等有机溶剂	Ni(Co盐中)
2-5	4-(5-氯-2-吡啶偶氮)-1,3-二氨基苯；钴试剂；5-Cl-PADAB	247.69	(I=0.2,20℃) H_3L^{3+} 5.4 H_2L^{2+} 1.3 HL^+ 5.4	红棕色结晶，熔点(249～251)℃，难溶于水，易溶于乙醇、乙醚、丙酮等中	Co
2-6	4-(2-吡啶偶氮)-1,3-二氨基苯；PADAB	213.24	(I=0.2,20℃) H_3L^{3+} 5.0 H_2L^{2+} 3.1 HL 6.1	红色结晶，不溶于水，易溶于一般有机溶剂(呈黄色)	Co

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(pK)	性质	测定元素
2-7	2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5-二乙氨基苯酚;5-Br-PADAP	349.23	(I=0.1) H_3L^{2+} 0.63 H_2L^+ 2.77 HL 11.23	砖红色结晶,熔点151℃,微溶于水,易溶于甲醇、丙酮、乙醇、三氯甲烷、乙醚、二氯乙烷和二氧六环等有机溶剂	Sb, Cu, Pb, Ni, U, V, Zn, Zr 等
2-8	2-(2-吡啶偶氮)-5-二乙氨基苯酚;PADAP	270.34	H_2L^+ 3.45 HL 11.98	棕红色结晶,熔点109℃,难溶于水,易溶于乙醇、甲醇、三氯甲烷、丙酮、环己烷和乙醚等有机溶剂	Co, V, Zr, U, Sb, Bi, Ga 等
2-9	4-(2-吡啶偶氮)间苯二酚	215.21	(I=0.2,水) H_3L^+ 3.1 H_2L 5.6 HL^- 11.9	橙红色或棕色无定形粉末,微溶于水(5mg/100mL,10℃)和乙醇,易溶于酸或碱性溶液;二钠盐($Na_2L\cdot 2H_2O$)是易溶于水的稍微吸湿的棕色粉末	Bi, Co, Cu, Ga, Fe, Pb, Mn, Ni, Mo, Nb, Pd 等
3-1	1-(2-噻唑偶氮)-2-萘酚;TAN	255.28	H_2L^+ 2.37 HL 8.94	橙黄色或红色针状结晶,熔点(135~141)℃。微溶于水,易溶于甲醇、乙醇、丙酮、DMF、三氯甲烷、四氯化碳和苯等有机溶剂	Cu, Co, Ni, Mn, Pd, Al 等
3-2	4-(2-噻唑偶氮)间苯二酚;TAR	221.23	H_3L^+ 0.98 H_2L 6.23 HL^- 9.44	橙色晶体粉末,熔点(200~202)℃,(分解),易溶于苯、三氯甲烷、四氯化碳、二氧六环和DMF等,也易溶于稀酸和稀碱溶液,几乎不溶于水	Cu, Zn, Co, Ni, 贵金属, Zr, Sc, 稀土等
3-3	2-(2-噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯甲酸	276.31	—	蓝绿色光泽针状结晶,微溶于水和四氯化碳,溶于DMF和酸或碱性水溶液	Ni
3-4	2-(2-噻唑偶氮)-5-二甲氨基酚	248.28	(I=0.1,25℃) H_3L^{2+} <1 H_2L^+ 2.8 HL 9.9	暗紫色针状结晶,难溶于水,易溶于乙醇、丙酮、DMF、己醇和酸性溶液	Nb, Ni, Fe, Bi 等

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
4-1	磺胺偶氮胂；磺胂氮烯　572.32 AsO_3H_2 O_2N—⟨苯环⟩—N═N—NH—⟨苯环⟩—N═N—⟨苯环⟩—SO_3Na	H_3L　H_2L 3.89　3.61 HL^{2-} 11.7	市售品或常使用的为一钠盐二水合物，红棕色结晶粉末，溶于水和稀碱溶液，但不溶于一般的有机溶剂	Pb；Cd，Zn等
4-2	镉试剂　346.35 O_2N—⟨苯环⟩—N═N—NH—⟨苯环⟩—N═N—⟨苯环⟩	—	橙黄色结晶粉末，易溶于三氯甲烷，四氯化碳等一般有机溶剂，也溶于碱性乙醇	Hg，Cd，Ni，定性 Hg，Cd
4-3	新镉试剂；对磺酸基重氮氨基偶氮苯　381.41 ⟨苯环⟩—N═N—⟨苯环⟩—NH—N═N—⟨苯环⟩—SO_3H	11.60	棕褐色固体粉末，微溶于水，碱性水溶液中溶解度增加，易溶于丙酮、乙醇等有机溶剂(呈橙色)，加水稀释有橙色沉淀，加入 tritonx-100 沉淀溶解	Hg，Cd，Ni
4-4	钍试剂Ⅰ；试钍灵；Thoron Ⅰ　576.29 AsO_3H_2　HO　SO_3Na ⟨苯环⟩—N═N—⟨萘环⟩ SO_3Na	H_4L　H_3L 4　8 H_2L^{2-}　HL^- 11.5　14.0	市售产品为1～5钠盐，橙红色(一钠盐)到暗红色(五钠盐)结晶粉末，易溶于水，不溶于一般有机溶剂	Th，Li，U，Be，Ta，Nb，Zr
4-5	铬蓝黑R；钙试剂；酸性铬蓝黑　416.44 OH　HO NaO_3S—⟨萘环⟩—N═N—⟨萘环⟩	$(I=0.1)$ H_3L　H_2L^- 1.0　7.36 HL^{2-} 13.5	棕黑色粉末，溶于乙醇和水	Ca，Mg，Ga，U，稀土等
4-6	铬黑T　461.38 OH　HO NaO_3S—⟨萘环⟩—N═N—⟨萘环⟩ O_2N	$(I=0.1)$ H_3L　H_2L^- 3.85　6.83 HL^{2-} 11.5	通常为一钠盐(具有金属光泽的暗紫色粉末)，易溶于水和乙醇，但不溶于一般有机溶剂	Cd，Co，Mg，Zn，稀土，Th，Ca
4-7	钙镁试剂　358.37 OH　HO ⟨苯环⟩—N═N—⟨萘环⟩—SO_3H CH_3	$(I=0.1)$ H_2L　HL^{2-} 7.92　12.50	暗紫色粉末，易溶于水，试剂固体及水溶液稳定	Al，Co，Mo，Mg，Ca，Th，稀土
4-8	羟基萘酚蓝　620.46 OH　HO　SO_3Na NaO_3S—⟨萘环⟩—N═N—⟨萘环⟩ SO_3Na	$(I=0.1,$ $KCl, 24°C)$ H_2L^{3-}　HL^{4-} 6.44　12.93	通常为三钠盐，呈暗紫色粉末，易吸湿，溶于水和乙醇中	Ca，Sr，Ba，稀土，U

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
4-9	铍试剂Ⅰ 495.52	—	暗褐色结晶粉末，溶于水，微溶于乙醇，不溶于乙醚	Be
4-10	镓试剂 562.82	H_2L^{2-} 3.20　HL^{3-} 13.9	砖红色碎晶形固体，溶于水呈紫红色，也溶于乙醇、丙酮、异戊醇、三氯甲烷和四氯化碳	Ga, Mn, Pb, Zn
4-11	镁试剂；二甲苯胺蓝Ⅰ 411.46	H_2L 8.99　HL^- 14.01	红色粉末，溶于乙醇，不溶于水，固体及乙醇溶液在室温下稳定	Mg
5-1	*N*-苯甲酰-*N*-苯基羟胺；*N*-苯基苯甲酰羟肟酸；BPHA；BPA 213.24	(I=0.1) HL 8.2	无色针状结晶，对光、热、空气稳定，甚至在强无机酸中(硝酸除外)不分解，几乎不溶于水，易溶于三氯甲烷、苯、乙醇和四氯化碳等多种有机溶剂，溶于无机酸水溶液、乙酸和氨水	萃取光度 V, Ti, U, Mo
5-2	*N*-肉桂酰-*N*-苯基羟胺；*N*-苯基肉桂酰氧肟酸 239.31	HL 11.1	淡黄绿色针状结晶，物理性质类似于*N*-苯甲酰-*N*-苯基羟胺	萃取光度 V, U
5-3	*N*-苯甲酰-*N*-邻甲苯基羟胺；*N*-邻甲苯基苯甲酰氧肟酸 227.26	—	无色针状结晶，对光、热和空气稳定，不溶于冷水，溶于热水和乙醇、丙酮等有机溶剂	萃取光度 V
5-4	二甲基乙二醛肟；丁二酮肟；丁二肟 116.12	(I=0.01, 25℃) H_3L^+ 8.7　H_2L 10.6　HL^- 11.9	无色针状结晶粉末或晶形粉末，几乎不溶于水和三氯甲烷等，易溶于乙醇、丙酮、乙醚和碱性溶液	Ni, Re
5-5	苯基-α-吡啶酮肟 198.22	H_2L^+ 2.84　HL 12.19	白色结晶，熔点 161℃，微溶于水，易溶于乙醇、丙酮、DMF和乙醚等	Fe, Cu, Au, Pd 等

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
6-1	2,2′-联吡啶;α,α′-联吡啶 α,α′-联氮杂苯 156.19	(I=0.1,25℃) H_2L^{2+} HL^+ −0.28 4.4	白色结晶固体，溶于水(0.5g/100mL，20℃)，易溶于乙醇、乙醚、石油醚、三氯甲烷、苯及稀酸中	Fe
6-2	1,10-菲罗啉;1,10-二氮杂菲 198.23	(I=0.1,25℃) H_2L^{2+} HL^+ 0.70 4.98	白色或无色结晶粉末，通常含有一分子结晶水，溶于水和苯，更易溶于乙醇、丙酮和酸性溶液，不溶于乙醚	Fe
6-3	4,7-二苯基-1,10-菲罗啉;4,7-二苯基-1,10-二氮杂菲 332.41 C_6H_5 C_6H_5	HL^+ 4.30	无色或淡黄色结晶粉末，不溶于水，微溶于稀酸，易溶于乙醇、丙酮、苯、异戊醇、己醇和乙醇等一般有机溶剂	萃取光度，Fe，也可测 Cu
6-4	4,7-二苯基-1,10-菲罗啉二磺酸钠 536.48 NaO_3S SO_3Na	H_2L^{2+} HL^+ 2.83 5.20	淡黄或亮粉红色结晶粉末，极易溶于水，微溶于乙醇中，不溶于一般有机溶剂；于 110℃ 干燥 2h 后，直到 275℃质量不变	Fe
6-5	2,2′,2″-三吡啶 233.27	(I=0.1,25℃) H_3L^{3+} H_2L^{2+} −1.6 3.99 HL^+ 4.69	白色结晶固体，微溶于水，易溶于苯、三氯甲烷、乙醚和乙醇等有机溶剂和稀酸	Fe
6-6	4,7-二羟基-1,10-菲罗啉 248.67 HO OH · HCl	H_3L^+ H_2L 2.55 7.28 HL^- 11.5	黄色结晶粉末，微溶于水(pH≈8)和常用的有机溶剂，易溶于碱性水溶液(pH8)	强碱溶液中 Fe(Ⅱ)
6-7	新亚铜试剂;2,9-二甲基-1,10-二氮杂菲 208.26 H_3C CH_3	(I=0.1,25℃) HL^+ 5.85	市售品含有不同的结晶水，微溶于冷水，不溶于碱，易溶于乙醇、苯和三氯甲烷等有机溶剂和稀无机酸。 含 2 个氯化氢的新亚铜试剂为淡黄色易吸湿的结晶粉末，溶于水	Cu

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
6-8	三吡啶基三嗪;2,4,6-三(2-吡啶基)-1,3,5-三嗪;TPTZ 312.33	(I=0.23,25℃) H_2L^{2+} 2.82 HL^+ 2.75	淡黄色针状结晶，微溶于水，较易溶于乙醇，不溶于非极性溶剂，很易溶于稀盐酸	Fe
6-9	吡啶基二苯基三嗪;PDT 310.36	(25℃) HL^+ 2.96	淡黄色针状结晶，微溶于水，溶于乙醇及其他有机溶剂	Fe, Ru
6-10	吡啶二苯三嗪磺酸钠;PDTS 486.35	—	淡黄色或绿黄色粉末，通常所用的为含有 1mol 或 2mol 结晶水的单或双钠盐，易溶于水	Fe
6-11	2,2'-联喹啉;亚铜试剂 256.31	—	无色片状结晶，几乎不溶于水，溶于稀酸、甲醇、异戊醇、乙酸、乙酸异戊酯、二氧六环、乙腈和四氯化碳等，易溶于 DMF	萃取光度法 Cu
7-1	二安替比林甲烷;1,1'-二安替比林甲烷 DAM 388.47	H_2L^+ 9.96 HL 8.15 (MIBK 中) (I=0.1,25℃)	通常为含1分子结晶水的无色结晶。对空气、光、热、碱稳定，不溶于水，溶于无机酸，易溶于三氯甲烷，稍溶于苯和四氯化碳	萃取光度法 Au、Ti、Ir 等
7-2	二硫代二安替比林甲烷 420.60	H_2L^{2+} 0.22 HL^+ 2.69	白色闪光结晶或无色细小结晶，溶于无机酸和有机酸，也溶于乙醇、丙酮、乙酸和三氯甲烷等，不溶于水	Re, Pd, Bi, Au, As, Te 等
7-3	二安替比林甲基甲烷 402.50	—	无色结晶，微溶于水，溶于强酸、乙醇、三氯甲烷和二氧六环等	Bi, Sb, Te

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
7-4	二安替比林丙基甲烷 430.55	—	无色结晶，几乎不溶于水，稍溶于乙醚、己酮和四氯化碳，易溶于三氯甲烷、二氯乙烷、乙醇及强无机酸及有机酸	Re，Pd，Sb，Te，Se等
7-5	二安替比林苯基甲烷 464.57	—	无色结晶，微溶于水，戊烷、乙醚和四氯化碳，溶于三氯甲烷、二氯乙烷、硝基苯和强无机酸	Sb，Os，Ir
7-6	二安替比林-2-羟基苯基甲烷 480.57	—	无色结晶粉末，熔点(191~192)℃不溶于水，微溶于乙醇、丙酮和三氯甲烷等	Ti，Ce
8-1	茜素；1,2-二羟基蒽醌 240.22	—	橙红色针状结晶或黄色粉末，熔点(289~290)℃，(乙醇重结晶)，沸点430℃，易升华，易溶于乙醇、甲醇、乙醚、苯、乙酸、吡啶和二硫化碳等	Al，Zr，F
8-2	茜素红S；茜素红；1,2-二羟基蒽醌-3-磺酸 360.27	(I=0.5，25℃) H_2L^- (β-OH) 5.39 HL^{2-} (α-OH) 10.72	市售产品为1水合钠盐，黄棕色或橙黄色结晶粉末，溶于水显橙黄色，微溶于乙醇和丙酮	F^-，Ge，In，Co等
8-3	茜素氟蓝；茜素络合酮 421.36	(I=0.1) H_4L 2.40 H_3L^- 5.54 H_2L^{2-} 10.07 HL^{3-} 11.98	黄棕色结晶粉末，熔点190℃(分解)，几乎不溶于水、乙醚、乙醇及其他非碱性溶剂，但很易溶于碱性水溶液	F^-，Al，Mn
9-1	锌试剂；2-羧基-2'-羟基-5'-磺苯甲䐶 462.41	H_3L^- 4~4.5 H_2L^{2-} 7.9 HL^{3-} 13	一钠盐为暗紫色粉末，微溶于水和乙醇，易溶于碱性溶液显深红色，不溶于一般的有机溶剂，在酸性介质中快速分解	Zn，Cu

续表

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(pK)	性质	测定元素
10-5	2-亚硝基-4-二甲氨基苯酚盐酸盐;亚硝基-DMAP	202.64	(I=0.1, KCl,25℃) H_2L^+ HL 2.69 8.40	黄色针状结晶，熔点196℃，溶于水呈黄色，pH2.5转为红色，固体试剂至少可稳定2年，0.01mol·L⁻¹溶液可稳定1月	Ni, Co
11-1	8-羟基喹啉	145.16	(I=0.1,25℃) H_2L^+ HL 4.85 9.95	淡黄或无色结晶或粉末，熔点(74～76)℃，几乎不溶于水和乙醚，易溶于一般有机溶剂三氯甲烷、四氯化碳、苯等及乙酸和无机酸	Ag, Al, Bi, Ca, Co, Cu, Fe, Ga, Hf, La, Mg, Mo, Ni, Pb, Pd, Sc, U, V 等
11-2	8-羟基喹啉-5-磺酸	225.22	(I→0,25℃) H_2L^+ HL 4.10 8.76	淡黄色结晶粉末，熔点213℃(分解)，易溶于水，微溶于三氯甲烷、苯和乙醇等有机溶剂	Fe, Ta, V
11-3	7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸;高铁试剂;试铁灵	351.13	(I=0.1, KCl) H_2L 2.50($\overset{+}{N}$H) HL^- 7.10(OH)	淡黄粉末，熔点225℃(分解)，溶于水(≈0.2%，15℃)，稍溶于乙醇，不溶于三氯甲烷、苯和四氯化碳等有机溶剂	Fe
12-1	乙二醛-双(2-羟基缩苯胺);GHA;GBHA	240.26	—	无色或淡黄色针状结晶，熔点(210～214)℃(分解)，几乎不溶于水，稍溶于乙醇、苯和二氧六环，微溶于三氯甲烷，溶于碱性溶液，溶于甲醇(8.5mg·mL⁻¹)	Ca 及 U, Cd, Sc 等
12-2	水杨醛缩邻氨基苯酚;镓试剂	213.24	—	橙红色结晶，熔点(183～185)℃，难溶于热水，溶于乙醇和乙醚(呈淡黄色)	Cu, 荧光测 Al
12-3	双(水杨醛缩)-2,3-二氨基苯并呋喃	356.38	—	黄橙色结晶粉末，熔点(179～181)℃，微溶于水，溶于乙醇，二氧六环、石油醚、甲醇、苯和三氯甲烷等	Cu, Ni, Zn

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(pK)	性质	测定元素
12-4	3-羟基吡啶-2-甲醛吖嗪,3-羟基皮考啉甲醛连氮;3-OH-PAP	242.24	H_2L^+ HL 3.92 7.97	黄色结晶,熔点162℃,在紫外光下有荧光,微溶于水,溶于DMF、乙醇、三氯甲烷和苯等有机试剂	Cu,Co,Hg,Ag等
12-5	双环己酮-草酰二腙	278.35	—	无色晶状粉末,熔点213℃,几乎不溶于水,溶于热的50%乙醇	Cu
13-1	钛铁试剂;1,2-二羟基苯-3,5-二磺酸钠	332.21	(I=0.1,KCl,20℃) H_2L^{2-} HL^{3-} 7.66 12.6	二钠盐,含一分子结晶水,为无色针状结晶,易溶于水,微溶于乙醇;不溶于丙酮,乙醚等非极性有机溶剂,水溶液无色,可稳定1天以上	Ti,Fe,稀土
13-2	水杨酸;邻羟基苯甲酸	138.12	—	白色针状结晶或粉末,熔点(157~159)℃,76℃时升华,稍溶于冷水,易溶于沸水、乙醇、乙醚和丙酮等,也溶于苯和三氯甲烷	Ti,Fe,U
13-3	磺基水杨酸;5-磺基水杨酸	254.22	(I=0.1~0.15) H_2L^- HL^{2-} 2.62 11.95	白色结晶或结晶性粉末,熔点113℃,无水物115℃开始熔融,180℃分解,具有潮解性,溶于水,乙醇和乙醚	Fe
13-4	变色酸;铬变酸;4,5-二羟基-2,7-萘二磺酸	356.33	H_4L H_3L^- 0.6 0.7 H_2L^{2-} HL^{3-} 5.45 15.5	纯品为无色针状结晶粉末,含2分子结晶水,受空气氧化变为浅红色,易溶于水,不溶于一般的有机试剂	Ti,NH_3,甲醛
13-5	3,3′-二氨基联苯胺 $\cdot HCl \cdot 2H_2O$	396.14	—	无色针状结晶,熔点(328~330)℃(分解),光照下逐渐变暗,易溶于水,不溶于非极性的有机溶剂	V,Se

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
13-6	邻苯二胺 108.14	(I=0.1,20℃) H_2L^{2+} HL^+ 0.86 4.75	无色单斜体结晶，在空气中及光照下变暗，熔点(101～103)℃，沸点 257℃，溶于水，易溶于乙醇、乙醚及三氯甲烷中	Se
13-7	2,3-二氨基萘 158.20		纯品为无色片状结晶(乙醇重结晶)，受空气氧化而呈黄或灰棕色，熔点(190～191)℃，几乎不溶于冷水或乙醇，但在50℃以上溶解，可溶于乙醚	光度测 Te，荧光测 Se
14-1	铬天青 S;CAS 539.34	(I=0.1) H_3L^- H_2L^{2-} 2.25 4.88 HL^{3-} 11.75	市售三钠盐二水合物为红棕色粉末，易吸湿，易溶于水为橙黄色溶液；在乙醇中的溶解度比水中溶解度小，呈红棕色	Al,Be等30多种元素
14-2	深蓝 6B;酸性媒介深蓝 B 459.34	H_3L H_2L^- 3.2 4.7 HL^{2-} 12.4	橙红色粉末，熔点271℃(分解)，溶于乙醇中，呈黄橄榄色，比 CAS 在水中的溶解度小	Al，Be，Se，Cu，稀土等
14-3	铬菁 R;ECR 470.46	(I=0.1) H_3L^- H_2L^{2-} 2.32 5.45 HL^{3-} 12.1	砖红色粉末，溶于水、乙醇	Al
14-4	邻苯二酚紫 386.38	(I=0.1) H_3L^- H_2L^{2-} 8.01 10.00 HL^{3-} 11.93	暗红棕色结晶粉末，易溶于水和乙醇水溶液，微溶于冷乙醇或冰乙酸，不溶于非极性有机溶剂如苯、二甲苯和乙醚，易吸潮	稀土，Zr，Nb，Ga，Mo，Sn，Y，Al 等

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(pK)	性质	测定元素
14-5	二甲酚橙 $(HOOCH_2C)_2NCH_2$ $CH_2N(CH_2COOH)_2$ HO O H_3C C $CH_3\cdot 2H_2O$ SO_3H	706.70	(I=0.1) H_9L^{3+} −3.32 H_8L^{2+} −1.83 H_7L^{+} −1.04 H_6L <1.5 H_5L^{-} 2.32 H_4L^{2-} 2.85 H_3L^{3-} 6.74 H_2L^{4-} 10.56 HL^{5-} 12.23	市售一般为二钠或三钠盐，暗红色或棕红色晶体粉末，易吸湿；钠盐极易溶于水，微溶于乙醇和及其他有机溶剂；市售品通常是二甲酚橙和半二甲酚橙的混合物	Bi, Cr, In, Sc, Zr, Y, Zn, Al 等
14-6	甲基百里酚蓝；甲基百里香酚蓝；甲基麝香草酚蓝；MTB $(HOOCH_2C)_2NCH_2$ $CH_2N(CH_2COOH)_2$ HO CH_3 H_3C O $(H_3C)_2HC$ $CH(CH_3)_2$ C SO_3H	756.85	(0.1mol·L^{-1} KNO_3) H_6L 1.8 H_5L^{-} 2.0 H_4L^{2-} 3.0 H_3L^{3-} 6.9 H_2L^{4-} 11.1 HL^{5-} 12.9	市售试剂为一或二钠盐，暗紫色到黑色结晶粉末，熔点（252～256）℃（分解），易吸湿，溶于水，不溶于乙醇及其他有机溶剂	Al, Ca, Mg, Hf, Zr, Nb, Ti, 稀土等
14-7	半二甲酚橙；Semi-XO；SXO CH_3 CH_3 HO O C $CH_2N(CH_2COOH)_2\cdot H_2O$ SO_3H	545.56	(I=1, 25℃) H_6L^{2+} −0.65 H_5L^{+} 0.53 H_4L <1.5 H_3L^{-} 2.60 H_2L^{2-} 7.47 HL^{3-} 10.9	红色结晶粉末，熔点（201～204）℃（分解），溶于水，微溶于乙醇	Zr, Zn, Bi
14-8	苯基荧光酮；苯芴酮；2,3,7-三羟基-9-苯基-6-荧光酮 HO O O HO C OH	320.30	(25%乙醇) H_4L^{+} 2.3 H_3L 5.8 H_2L^{-} 11.3 HL^{2-} 12.3	红色或橙色结晶粉末，熔点 350℃，微溶于水、冷乙醇，易溶于已酸化的乙醇和硫酸，强碱中逐渐分解，在 pH8 以上的乙醇溶液中带有绿色荧光	Ge, Nb, Se, Sn, Co, Fe, In, Mo, Ni 等
14-9	4,5-二溴苯基荧光酮；二溴苯芴酮 Br Br HO O O HO C OH	478.10	(I=1) H_4L^{+} 0.33 H_3L 4.44 H_2L^{-} 9.88 HL^{2-} 11.84	红色粉末，熔点大于 300℃，不溶于水，溶于乙醇、乙酸及硫酸溶液	Ti, Sn, Sb 等
14-10	邻硝基苯基荧光酮；邻硝基苯芴酮 HO O O HO C OH O_2N	365.30	(I=0.1) H_4L^{+} 2.60 H_3L 6.27	暗红色结晶，不溶于水，稍溶于丙酮、苯、二氯乙烷和四氯化碳，易溶于酸化的乙醇、碱溶液和浓无机酸	Nb, Sn, Ge, Ti 等

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
14-11	对硝基苯基荧光酮;对硝基苯芴酮 365.30	(I=0.1) H_4L^+ H_3L 2.26 6.06 H_2L^- HL^{2-} 9.95 11.6	红棕色结晶,熔点大于310℃,难溶于水,稍溶于二氯乙烷、三氯甲烷、乙醇和丙酮,溶于己酸化的乙醇、浓硫酸及碱溶液	Sn
14-12	间硝基苯基荧光酮 365.30	(I=0.1) H_2L HL 2.51 6.09	红橙色固体粉末。熔点大于130℃。几乎不溶于水;稍溶于乙醇、乙醚、丙酮、三氯甲烷和四氯化碳等一般有机溶剂;易溶于浓无机酸和无机碱中	W, Mo, Zr, Ti 等
14-13	水杨酸(基)荧光酮,邻羟基苯基荧光酮 336.31	(I=0.1) H_5L^+ H_4L 3.58 6.07	红棕色粉末。溶于已酸化的乙醇、丙酮;微溶于水,乙醚,三氯甲烷和苯。也溶于浓碱溶液,但不稳定,逐渐分解	Ti, Sn, Ge, W, Zr, Nb, Mo 等
14-14	茜素紫 364.30	H_5L^+ H_4L 1.50 4.58 H_3L^- H_2L^{2-} 5.90 9.18 HL^{3-} 11.22	棕红色粉末或结晶(带有 $1\frac{1}{2}H_2O$),约180℃失去结晶水,微溶于冷水;稍溶于热水,几乎不溶于苯、三氯甲烷;溶于醇、丙酮和碱	W, Mo, Zr, Sn
14-15	二溴茜素紫 522.11	(I=0.1, 10%乙醇-水) H_4L H_3L^- 2.62 4.80 H_2L^{2-} HL^{3-} 8.54 10.95	棕红色粉末。微溶于水;几乎不溶于苯、三氯甲烷;溶于醇、丙酮、碱溶液	W, Mo
14-16	连苯三酚红;磺酸茜素紫 400.36	H_4L H_3L^- 3 6.5 H_2L^{2-} HL^{3-} 10 14	暗红色结晶粉末,带有金属光泽。微溶于水和乙醇;不溶于苯、四氯化碳等非极性溶剂	Ga, Ag, Mo, Ti, W, Ta

续表

编号	名称、结构式与 M_r	M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
14-17	溴连苯三酚红;3,3'-二溴磺酸茜素紫	558.15	H_4L 2.43　H_3L^- 5.18　H_2L^{2-} 9.21　HL^{3-} 11.47	具有金属光泽的暗红结晶粉末。微溶于水和乙醇;不溶于苯,四氯化碳等非极性溶剂	Sm, Nb, Sn, Ag, Sb, Bi, Ge
14-18	铝试剂;玫红三羧酸	422.35	—	应用的多为铵盐,红棕色固体粉末。溶于水;微溶于乙醇,几乎不溶于丙酮	Al, Be
14-19	半甲基百里酚蓝	611.71	(I=0.1,25℃) H_5L^+ 2.0　H_4L 2.81　H_3L^- 7.61　H_2L^{2-} 7.60　HL^{3-} 12.12	紫色粉末。吸潮并易溶于水;不溶于一般的有机溶剂	Co, Ni, Zn, Cu, Zr
15-1	亮绿;灿烂绿;煌绿;品绿;碱性亮绿	421.06	—	亮绿色微结晶粉末,通常以氯化物或硫酸盐形式存在。溶于水显绿色(9.7g/100ml),溶于乙醇显绿色,溶于浓硫酸中显黄色	Au, Ge, Sb, Ta, B, Re, ClO_4^- 等
15-2	孔雀石绿;孔雀绿;品绿;盐基品绿;块绿;碱性孔雀绿	364.92	—	具有光泽的绿色结晶粉末,溶于水显蓝绿色(4.0g/100ml),溶于甲醇、乙醇,溶于浓硫酸显黄色	Zn, Co, U, Re
15-3	甲基绿	594.75	—	商品通常为锌复盐。具有金属光泽的绿色微结晶或亮绿色粉末。溶于水显蓝绿色(2g/100g),不溶于戊醇	Hg, Re 等
15-4	结晶紫	570.12	—	通常作为氯化物存在。带有黄绿色光泽或绿色金属光泽(无水染料)针状结晶。熔点 194～196℃,溶于水、乙醇和三氯甲烷,显紫色,不溶于乙醚;浓硫酸中显黄色	B, Sb, Mo, I, Br, P, As, Re, Tl, Ta, Au 等

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(p*K*)	性质	测定元素
15-5	乙基紫 $(C_2H_5)_2N$—⟨苯环⟩—C(—⟨苯环⟩—$N(C_2H_5)_2$)=⟨醌环⟩=$\overset{+}{N}(C_2H_5)_2Cl^-$	492.20		绿色结晶。溶于水呈蓝紫色，也溶于乙醇	Hg，Tl
15-6	甲基紫 $(CH_3)_2N$—⟨苯环⟩—C(—⟨苯环⟩—NH_2，$NHCH_3$ 或 $N(CH_3)_2$)=⟨醌环⟩=$\overset{+}{N}(CH_3)_2Cl^-$	379.92 (393.95；407.97)	—	蓝紫色粉末。有绿色光泽。溶于水和乙醇为紫色，也溶于甘油、三氯甲烷，不溶于醚	荧光度，Nb，Zr，Hf，Ta，Au，Tl等
15-7	罗丹明B；玫瑰红B；玫瑰精B $(C_2H_5)_2N$—(氧杂蒽环，O)—C(—⟨苯环⟩—COOH)=$\overset{+}{N}(C_2H_5)_2Cl^-$	479.02	—	通常为氯化物，呈绿色至红紫色结晶粉末。易溶于水、乙醇和溶纤剂，显蓝色并带有强的黄色荧光。微溶于三氯甲烷，丙酮和 1mol·L^{-1} 盐酸	Au，Ca，Cd，Ga，Sb，Nb，V，Re，Ge，U，稀土等
15-8	丁基罗丹明B $(C_2H_5)_2N$—(氧杂蒽环，O)—C(—⟨苯环⟩—$COOC_4H_9$)=$\overset{+}{N}(C_2H_5)_2\cdot Cl^-$	535.12	—	其氯化物为暗紫红色(黑褐色)晶体粉末。溶于水(0.035mol·L^{-1})、丙酮、乙醇和酸性溶液，不溶于甲苯、苯、三氯甲烷和乙醚	B，Re，Ta，Nb，Tl，ClO_4^- 等
15-9	品红；盐基品红 H_2N—⟨苯环(CH_3)⟩—C(—⟨苯环⟩—NH_2)=⟨醌环⟩=$\overset{+}{N}H_2Cl^-$	409.93	—	暗绿色光亮的正方结晶。稍溶于水，带红色，加热较易溶解；易溶于乙醇；不溶于乙醚	Br，NO_2^-
15-10	亚甲基蓝；亚甲蓝 $(CH_3)_2N$—(吩噻嗪环，N，S)=$\overset{+}{N}(CH_3)_2Cl^-\cdot 3H_2O$	373.88		发亮的深绿色结晶，或细小深褐色粉末，溶于水和乙醇、异戊醇、丁醇、戊醇及浓硫酸。微溶于三氯甲烷；不溶于苯、乙醚	Re，Au，B，Ce，Cu，Ga，Ta，Sb，ClO_4^- 等

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
16-1	双硫腙;二苯基硫卡巴腙;苯肼硫羰酰偶氮苯;铅试剂 256.32	H_2L^+ HL 4.45 >12	带有金属光泽的紫黑色结晶粉末。熔点165～169℃(分解),不溶于水,难溶于乙醇;易溶于四氯化碳、苯和三氯甲烷等有机溶剂。溶于碱	萃取光度,Zn,Cd,Hg,Ag等
16-2	二乙基二硫代氨基甲酸钠;铜试剂;二乙基氨荒酸钠;Na-DDTC,Na-DDTC 225.31	(I=0.1,20℃) HL 3.6	市售产品通常为三水一钠盐,无色结晶,无水钠盐熔点为(94～96)℃。溶于水呈碱性,也溶于乙醇;微溶于三氯甲烷、乙醚、丙酮等一般有机溶剂,固体稳定,在酸性溶液中快速分解	Cu,Bi,Ni,Cd,Pb,Hg,Pd,Zn等
16-3	二乙基二硫代氨基甲酸二乙铵;二乙基氨荒酸二乙基铵 222.41	—	无色结晶。熔点(82～83)℃。溶于水、三氯甲烷、四氯化碳及其他有机溶剂。试剂溶液对酸稳定	As,Cu
16-4	二乙基二硫代氨基甲酸银;二乙基氨荒酸银 DDTC银盐 512.26	—	淡黄色结晶粉末。几乎不溶于水,易溶于吡啶和三氯甲烷,难溶于乙醇、异戊醇、丙酮、苯	As,Sb
16-5	硫代米蚩酮;4,4'-双(二甲氨基)硫苯酮 284.42	—	暗红色细晶形粉末。熔点202℃,不溶于水;溶于乙醇呈深黄色,也溶于丙醇、甲醇和三氯甲烷等	Ag,Au,Hg,Pd,Pt,Ir等
16-6	铋试剂Ⅰ;铋硫酚 264.32	(20℃) HL 3	通常以钾盐形式存在。熔点(243～248)℃,为无色或淡黄色针状结晶。试剂较稳定,但可被缓慢氧化为二硫化物。易溶于水、乙醇和丙酮	Te,Se,As,Re,重量法测Bi

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
16-7	甲苯-3,4-二硫酚;二硫酚;锡试剂 156.26	(水,25℃) H_2L HL^- 5.34 11.0	无色结晶。熔点(31～34)℃,微溶于酸性溶液;易溶于一般的有机溶剂和稀碱溶液。有刺激性气味,空气中极易被氧化,水溶液临用前配制	Sn, Ag, Mo, W, Re, Tc
16-8	8-巯基喹啉 197.25	(水) H_2L^+ HL 2.0 8.36	暗蓝色油状物,二水合物为暗红色针状晶体。熔点(58～59)℃,微溶于水,易溶于乙醇、三氯甲烷等,空气中易氧化。其钠盐和盐酸盐易溶于水、无机酸及极性有机溶剂	萃取光度, Mo, Bi, In, Pb, Sb 等
16-9	硫脲 76.12	H_2L^+ HL −11.9 14.96	无色斜方状或针状无色结晶。熔点180℃,溶于水和乙醇;微溶于乙醚	Bi, Os, Se, Ru, Al, Re 等
17-1	乙酰丙酮;2,4-戊二酮 100.11 $CH_3C(=O)—CH_2—C(=O)CH_3$	烯式 (I=0.1,25℃) HL 8.82	无色可燃液体,熔点−23℃;沸点(135～137)℃(9.9×10⁴Pa),能溶于水(15g/100ml,30℃)、醇、醚、三氯甲烷等有机溶剂;可溶于稀盐酸	萃取光度, Fe, U
17-2	噻吩甲酰三氟丙酮 222.20	(I→0,25℃) HL 6.18	无色结晶固体。熔点(42.5～43.2)℃,沸点(103～104)℃(1.2×10^3Pa);溶于水(2×10^{-2}g/100ml)、乙醇、丙酮、苯、乙醚和二甲苯	萃取光度, U, Pt, Pd, Rh, Cu, 稀土
17-3	硫代噻吩甲酰三氟丙酮 238.24	HL 3.96	红色针状结晶。熔点(61～62)℃,微溶于水;易溶于苯、甲苯、丙酮和乙醚等;稍溶于二氧六环、DMF	Ag, U, V, Au, Bi, Fe, Ga, Tl

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
18-1	桑色素;3,5,7,2',4'-五羟基黄酮 338.27	H_4L^- 4.8　H_3L^{2-} 7.0　H_2L^{3-} 9.0　HL^{4-} 13.0	无色或淡黄色结晶粉末。熔点(303～304)℃。几乎不溶于水;微溶于乙醚和乙酸;溶于浓硫酸,呈蓝绿色荧光	Sn,W,Mo,Zr,Y 等
18-2	槲皮素;栎皮黄素;栎精;3,3',4',5,7-五羟基黄酮 338.27	(40%乙醇,25℃) H_6L^+ 1.05　H_5L 7.47　H_4L^- 8.64	黄色针状结晶。熔点(316～317)℃。不溶于冷水,尚可溶于热水。易溶于三氯甲烷、甲醇、热乙醇和乙酸等,难溶于冷乙醇和丙酮	Th,Zr,Bi,Ge,Sn,W
18-3	山奈酚;3,5,7,4'-四羟基黄酮 286.24	—	黄色针状结晶。熔点(276～278)℃。微溶于水;溶于热乙醇、乙醚、碱溶液	Zr,Sn,Sc
18-4	芦丁;芸香甙 664.6 ($\cdot 3H_2O$; $OC_6H_{10}O_4—OC_6H_{11}O_4$)		淡黄或淡绿色结晶粉末,188℃下变软,(211～215)℃分解。难溶于乙醚、三氯甲烷、苯及二硫化碳等,也难溶于冷乙醇和水;但溶于热乙醇	Ge,Ga,Zr 等
19-1	15-冠醚-5;1,4,7,10,13-五氧杂环十五烷 220.27	—	无色粘稠液体,沸点(100～135)℃(26.6Pa),78℃(6.65Pa),难溶于水;溶于醇、芳烃和石油醚	萃取光度,碱金属离子
19-2	18-冠醚-6;1,4,7,10,13,16-六氧杂环十八烷 264.32	—	无色晶体,熔点(36.5～38)℃,溶解性能与 19-1 类似	
19-3	二苯并-18-冠醚-6;2,3,11,12-二苯并-1,4,7,10,13,16-六氧杂环十八烷-2,11-二烯 360.41	—	无色纤维状结晶;熔点(162～164)℃,沸点(380～384)℃,对皮肤有刺激,微溶于水和乙醇;溶于苯、二噁烷、二氯甲烷、氯仿、吡啶和甲酸	

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(pK)	性质	测定元素
19-4	二苯并-24-冠醚-8;2,3,14,15-二苯并-1,4,7,10,14,16,19,22-八氧杂环二十四 2,14 二烯	448.51	—	无色结晶,熔点(113~114)℃,溶解性能与 19-3 类似	萃取光度,碱金属离子
19-5	二环己基-18-冠醚-6;2,3,11,12-二环己基-1,4,7,10,13,16-六氧杂环十八烷	372.50	—	无色或淡黄色蜡;各种不同空间结构环己烷的同分异构体的混合物;熔点(38~54)℃;对皮肤有刺激;溶解性能与 19-1 类似	
19-6	二环己基-24-冠醚-8;2,3,14,15-二环己基-1,4,7,10,13,16,19,22-八氧杂环二十四烷	460.61		淡黄色粘稠液体;熔点小于 20℃;溶解性能与 19-1 类似	
19-7	穴醚 222;4,7,13,16,21,24-六氧杂-1,10-二氮杂二环(8,8,8)-二十六烷;克泼托弗克斯 222[①]	376.49	—	无色结晶;熔点(69~70)℃,应该在氮气气氛下贮存于暗处。溶于水,溶于丙酮、乙腈、苯、氯仿、二氯甲烷、二甲基甲酰胺(DMF)、二甲亚砜(DMSO)、二噁烷、乙酸乙酯、硝基甲烷、吡啶、四氯化碳;难溶于乙醚和石油醚	
19-8	穴醚 221;4,7,13,16,21-五氧杂-1,10-二氮杂二环(8,8,5)-二十三烷;克泼托弗克斯 221[①]	332.44	—	无色粘稠液体;应该在氮气气氛下贮存于暗处。溶解性能与 19-7 类似	
19-9	穴醚 211;4,7,13,18-四氧杂-1,10-二氮杂二环(8,5,5)-二十烷;克泼托弗克斯 211[①]	288.39	—	无色粘稠液体;应该在氮气气氛下贮存于暗处。溶解性能与 19-7 类似	

续表

编号	名称、结构式与 M_r		离解常数(pK)	性质	测定元素
20-1	α,β,γ,δ-四苯基卟吩 R = C_6H_5—	614.75	—	紫色针状晶体，熔点300℃，空气中稳定，不溶于水和乙醇，微溶于乙酸，易溶于苯，氯仿，DMF和THF	Zn，Cu
20-2	α,β,γ,δ-四苯基卟吩四磺酸 R = (苯基, SO_3H)	1221.30	—	蓝色晶体，易溶于水	Cd，Pd，Zn
20-3	α,β,γ,δ-四苯基卟吩三磺酸 R = 苯基 和 (SO_3H 苯基)	926.98	(25℃) H_4L^{2+} H_3L^+ 4.86 4.95	蓝色晶体，易溶于水	Cd，Cu，Fe，Pb，Pd
20-4	α,β,γ,δ-四(3-*N*-甲基吡啶)卟吩 R = (N-CH_3 吡啶基)	1363.70	(I=0.1,NO_3^-，25℃) H_3L^+ 2.3	绿色晶体，缓慢溶于水	Cu
20-5	α,β,γ,δ-四(4-*N*-甲基吡啶)卟吩；T(4-MPy)P R = CH_3—N^+(吡啶基)—	1076.64	H_4L^{2+} H_3L^+ 0.80 2.06	绿色晶体，缓慢溶于水	Zn，Mg
20-6	α,β,γ,δ-四(5-磺基噻吩)卟吩；T(5-MPy)P R = HO_3S—(噻吩基)—	959.12	H_4L^{2+} H_3L^+ 5.49 6.05	绿色晶体，易溶于水	Zn
20-7	α,β,γ,δ-四(4-三甲铵基苯)卟吩；TTMAPP R = $(CH_3)_3N^+$—C_6H_4—	1531.95	(0.1mol·L^{-1} NO_3^-，25℃) H_4L^{2+} H_3L^+ 3.65 3.81	暗紫色晶体，易溶于水	Cu，Cd，Pd，Zn
21-1	姜黄素；1,7-双(4-羟基-3-甲氧基苯)-1,6-庚二烯-3,5-二酮 O=C(CH=CH—C_6H_3(OH)OCH_3)—CH_2—C(=O)—CH=CH—C_6H_3(OH)OCH_3	368.39	—	橙黄色结晶粉末。熔点183℃。不溶于水；易溶于甲醇、乙醇、丙酮、冰乙酸和二硫化碳；微溶于乙醚；溶于碱	B

续表

编号	名称、结构式与 M_r	离解常数(pK)	性质	测定元素
21-2	氯冉酸;3,6-二氯-2,5-二羟基-对苯醌 209.08	(I=0.15,25℃) H_2L HL^- 0.81 2.72	橙红色片状结晶。熔点(183~184)℃。几乎不溶于冷水和石油醚;不溶于乙醚、三氯甲烷和苯;稍溶于乙醇,易溶于碱性溶液,也可溶于热水	Ca, Mo, Nb, W, 等
21-3	达旦黄;钛黄;噻唑黄;双-4,4'-(甲基苯并噻唑)对重氮氨基苯(2,2')二磺酸钠 695.42		浅棕黄色粉末,溶于水、醇呈黄色;溶于氢氧化钠等碱性溶液中呈红黄色,硫酸溶液中呈棕黄色	Mg

① 克洛托弗克斯(Kryptofix)是德国 E. Merck 公司生产的含氮多环聚醚化合物的商品名。

参 考 文 献

1 罗庆尧等编著. 分光光度分析. 北京:北京科学出版社,1992
2 马清河等. 分析化学,1994;22(9): 961
3 何锡文等. 分析试验室, 1987; 6(5—6): 1
4 张贵珠等. 分析试验室, 1989; 8(4): 86
5 郑用熙等. 分析试验室, 1991; 10(4): 1
6 郑用熙等. 分析试验室, 1993; 12(3): 80
7 徐其亨等. 分析试验室, 1995; 14(4): 61
8 徐其亨等. 分析试验室, 1997; 16(4): 88
9 曾云鹗等编. 现代化学试剂手册·第四分册: 无机离子显色剂. 北京: 化学工业出版社, 1989

第十六章　二元显色体系及其应用

第一节　概　　述

二元显色体系是最早应用于吸光光度法的一种显色体系，尽管自60年代以来多元络合物吸光光度分析的应用得到迅速的发展。但当前二元显色体系吸光光度法的应用仍十分普遍，特别是一些经典的方法，随着新的有机显色剂的不断涌现，在二元显色体系中，出现了不少高灵敏度的方法，其中以卟啉类、偶氮氯膦类、偶氮胂类、偶氮羧类及杂环偶氮染料类等较为突出。近十多年来有关二元显色体系在测定金属和非金属方面的应用文献仍有大量报道，1990年7月至1994年6月间在我国发表的二元显色体系的主要应用文献达341篇[1,2]。在早期出版的吸光光度法的专著[3]中也都全面地介绍了二元显色体系的金属与非金属元素的吸光光度法测定。本章限于篇幅从近十多年来在国内外发表的数千篇二元显色体系的应用文章上挑选了少部分文献以供读者参考，选择的原则是以摩尔吸光系数大于1×10^5为标准，部分金属和非金属元素的二元显色体系的摩尔吸光系数达不到1×10^5的话以选其中较高的和较普遍使用的，在下节的应用部分列举了两张应用表，将稀土元素的吸光光度测定单独列表。我国是稀土元素生产大国，占世界之首，其应用范围日益扩展，稀土元素分析化学也得到快速发展。为读者查阅方便，在表16-2中汇总了近十多年的部分文献，约244篇。

第二节　二元显色体系吸光光度法在金属和非金属元素测定中的应用

本节包括了两个应用实例的表，表16-1列出了除稀土元素以外的60多种金属和非金属的测定实例，以元素符号英文字顺排列。表中简要列出了显色剂、测定条件、组成比、λ_{max}、ε、测定范围和应用。其作用仅供检索之用。表16-2是稀土元素测定的二元显色体系吸光光度法应用实例。

表16-1　二元显色体系吸光光度法的应用

元素	显色剂	测定条件	组成比(M∶L)①	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	应　用	文献
Ag	Phen②-α,β,γ,δ-四(对磺基苯)卟啉	pH9.5	—	438	13.6	(0~0.4)μg·ml^{-1}	废水	1
	氮杂大环化合物	pH＝4.5～5.4，萃取光度	—	580	90	(0.01~0.4)μg·ml^{-1}	—	2
	硫代米蚩酮(TMK)	pH＝2.8～3.2，异戊醇等萃取	—	540	9.4	—	—	3
Al	铬天青S(CAS)	HAc-NH_4Ac，抗坏血酸	—	545	6.2	(2.5~35)μg/50ml	合金，硅铁	4~6
	间溴偶氮氯酸-m	pH＝2.3~4.0	—	690	11	—	钢铁，纯铁	7
	依来铬氰蓝R	—	—	535	6.5	(1~8)μg/25ml	铜、锌	8
As	溴化汞-乙醇	吸收AsH_3	—	385	18.2	(0~9)μg/25ml	水	9
Au	罗丹明B	酸性，苯等萃取	—	565	9.7	—	汞，矿物	10,11
	4′-四乙基二胺二苯甲硫酮(TEDAT)	pH＝4.2~6.0	1∶3	555	19.5	—	—	12
	艳色二甲苯蓝FF	碲共沉淀分离	—	608	13.0	(0~10μg/10ml	矿样	13

续表

元素	显色剂	测定条件	组成比 (M∶L)①	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	应　用	文献
Au	*meso*-四(*N*-甲基-3-吡啶基)卟啉	0.2mol · L^{-1} H_2SO_4	—	432 402.8	32.4	(0～44)μg/25ml	—	14
	meso-四(4-三甲胺苯基)卟啉-Hg	pH9.23		447	24.1	(0～0.2)μg · ml^{-1}	镀液	15
	α,α'-联吡啶	盐酸羟胺还原	1∶2		17.2	—	—	16
	硫代米蚩酮(TMK)	—	—	550	16	—	矿石	17～24
B	姜黄素	NH_4Ac-HAc	1∶2	555	13～18	—	—	25～27
	姜黄、甲基戊二醇、$CHCl_3$	浓 H_2SO_4	—	555	18.5	0.25μg · ml^{-1}	钢铁、植物	28
Ba	间溴偶氮羧	pH2.0，混酸-NaOH,α,α-联吡啶	1∶2	710	15	(0～15)μg/25ml	NaCl,合金标样	29
	二溴磺苯偶氮胂(DBS-AsA)	(0～0.12)mol · L^{-1}HCl	1∶3	616	6.48	(0～25)μg/25ml	孕育剂	30
Be	偶氮氯膦-PB	pH9,氨-氯化铵	1∶2	615	3.15	(0～10)μg/25ml	矿石、工业废水	31，32
	4-(2-苯胂偶氮)-1,3-二羟基萘	pH11.5	1∶2	490	4.0	—	铝合金	33
	偶氮氯膦Ⅲ	pH5.5	1∶1	550	3.4	(1～6.5)μg/25ml	铍青铜	34
Bi	2-(4,5-二甲基噻唑-2-偶氮)5-二乙氨基酚(DMTAE)	pH2.8(邻苯二甲酸氢钾)	1∶2	590	10	(0～3.8)μmol · L^{-1}	合金钢、铜、水等	35
	DBC-偶氮胂	1.2mol · L^{-1} $HClO_4$	–	632	9.0	(0～10)μg/25ml	铜合金、人发	36
	三氯偶氮氯膦(TCCPA)	(2.14～1.2)mol · L^{-1} $HClO_4$，40%乙醇	1∶2	640	11.1	(0～15)μg/25ml	人发	37
	二溴-氯偶氮氯膦	(0.005～0.6)mol · $L^{-1}$$H_2SO_4$，乙醇	1∶2	642	10.6	(0～15)μg/25ml	铅基合金等	38
	对甲基二溴偶氮胂	0.5mol · L^{-1} $HClO_4$，1mol · L^{-1} H_3PO_4	—	630	9.14	(0～20)μg/25ml	钢铁	39
	二溴偶氮氯膦	H_2SO_4 或 HNO_3	1∶2	675	8.9～10.6	—	—	40～43
	二溴磺酸-偶氮氯膦(DBS-CPA)	$HClO_4$-乙醇	—	639	9.54	(0～30)μg/25ml	高纯锌等	44
	2,6-二溴偶氮胂	—	—	628	9.9	—	铜、铜合金	45
	三溴偶氮溴膦	$HClO_4$，乙醇	1∶2	644	10	(0～20)μg/25ml	铸铁、紫铜	46
Br	碘-淀粉	—	—	570	9.0	(0～25)μg/25ml	岩矿	47
	荧光素	H_2O_2,pH4.6	—	510	5.1	(0～7)μg/25ml	水	48
BrO_3^-	5-Cl-PADAB	—	—	440	4.4	(3～64)μg/5ml	试剂，药物	49
CN^-	氯胺T、异烟酸、吡唑啉酮	—	—	640	6.0	(0～8)μg/25ml	天然水、炉渣、白酒	50～57
Ca	间溴偶氮羧-*m*	pH2.8 NaAc-HAc	1∶3	710	12.0	(0～12)μg/25ml	硅砂、岩矿	58
	偶氮胂 M	pH8.0,H_3BO_3-KCl	1∶2	640	29	(0～12.5)μg/10ml	牙膏	59
	间羧基偶氮羧	柠檬酸介质	1∶2	700	17	(0.5～5.0)μg/25ml	—	60
	对羧基偶氮羧	pH2.4	1∶2	718	15	(0～10)μg/25ml	头发、血清	61
	对乙酰基偶氮羧-P	柠檬酸介质	—	705	15	(0～7)μg/25ml	合金钢	62
Cd	双硫腙	中性至强碱性	—	520	8.8	—	有机物	63
	镉试剂 2B	1.5mol · L^{-1} H_2SO_4，KI，MIBK 萃取，0.04mol · L^{-1}KOH 显色	—	505	10.4	(0～10)μg/25ml	废水	64
	5-Br-PADAP	pH9,硼砂缓冲液	1∶2	560	11.6	(0～19)μg/25ml	水，土等	65
	4-(2-喹啉偶氮)-1,3-二羟基萘(2-QADNm)	0.17mol · L^{-1} NaOH,58℃,25min	1∶2	525	12	(0.01～0.072)μg · ml^{-1}	矿物	66

续表

元素	显色剂	测定条件	组成比(M:L)①	λ_{max}/nm	ε/10⁴	测定范围	应用	文献
Cd	2-羟基-3-羧基-5-磺酸苯基重氮氨基偶氮苯(HCSDAA)	氨性	1:3	520	18.2	(0~10)μg/25ml	人发	67
Cl_2	4,4′-二甲氨二苯硫酮	—	—	650	7.65	—	饮用水	68
ClO_4^-	向红菲咯啉铁(Ⅱ)	环己烷+硝基苯(6+1)	—	535	—	(3~10)μg/25ml	—	69
余氯	3,3′,5,5′-四甲基联苯胺(TMB)	pH≤2	—	450	6.89	(0.01~2.5)mg·L^{-1}	水,饮用水	70
Cl^-	$AgNO_3$(比浊)		—	420	—	(0~40)μg/10ml	硒合金	71
Co	3,5-DiBr-PADAT	pH=5.5~7.5,后加H_2SO_4	—	580	11.6	(0~2)μg·ml^{-1}	矿石	72
	5-Cl-PADAB	pH=5~7,沸水浴,酸性	—	570~574	17.7	—	土壤、大气、水	73~75
	2-[(5-Br-2-吡啶)偶氮]-5-二乙氨基苯酚(5-Br-PADAP)	0.1mol·L^{-1} H_2SO_4,NH_4F	—	580	10.3	(0~12.5)μg/25ml	钢铁、铜及其合金	76,77
	四(4-三甲铵苯基)卟啉(TAPP)	pH=9.0~11.0,乙二胺,沸水浴10min	1:1	427	27.8	(0~6)μg/25ml	茶叶,维生素B_{12}	78
	5-[(5-氯-2-吡啶)偶氮]-2,4-二氨基甲苯(5-Cl-PADAT)	pH=5~6,显色后加HCl至1.2mol·L^{-1}	1:2	570	12	(0~10)μg/25ml	钢、矿、VB_{12}等	79
	2-[(3,5-二氯-2-吡啶)偶氮]-5-二乙氨基苯酚(3,5-diCl-DEPAP)	pH4.1HAc NaAc	1:2	590	9.6	(0~12)μg/25ml	VB_{12}、分子筛	80
	2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5二甲氨基苯胺	pH=4.7~9.2,后加强酸HCl至(0.25~3.5)mol·L^{-1}	1:2	610	11.5	(0~15)μg/25ml	含钴分子筛、VB_{12}	81
	α,β,γ,δ-四(4三甲铵基苯)卟啉(TAPP)	pH9.6氢氧化钠-硼砂缓冲液		426	20.5	(0~15)μg/25ml	湖水、自来水	82
	meso-四(4-甲基-3-磺基苯)卟啉	pH8.5,咪唑催化	—	436	22.4	(1~1.5)μg/10ml	触媒、废水	83
	2-(4,5-二甲基-2噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯胺	pH7.4发色,酸化至12mol·L^{-1} $HClO_4$,测量	1:2	644	10.5	(0~12)μg/25ml	…	84
	4-[(5-氯-2-吡啶)偶氮]-1,3-二氨基苯(5-Cl-PADAB)	pH5时络合,然后酸化至2.4mol·L^{-1}HCl	1:2	570	11	—	—	85
	2-(3,5-二氯-2-吡啶偶氮)5-二甲氨基苯胺(3,5-diCl-PADMA)	pH=3.5~9.0(pH4.88),后(0.6~3.8)mol·L^{-1} HCl	1:2	612	11.6	(0~0.6)mg·L^{-1}	—	86
	3,5-DiBr-PADAB	pH=4.0~6.5,HAc-NaAc	1:2	588	12.7	(0~15)mg·L^{-1}	钢铁	87
Cr	二安替比林苯乙烯甲烷[Mn(Ⅱ)存在]	H_3PO_4	—	540	19	—	—	88
	间甲偶氮羧	pH=3.0~4.5,(8~13)℃	1:1	695	10	—	—	89
	间溴偶氮羧-*m*	pH=2.63~3.82,(15~35)℃	1:1	680	12	—	—	90
	二溴羧基偶氮胂褪色	(0.3~0.6)mol·L^{-1} HNO_3,沸水浴8min		530	14	(0~4)μg/25ml	合金钢	91
Cu	3,5-DiBr-PADAP	$V_{H_2O}:V_{C_2H_5OH}$=4:6,pH9.4	1:2	570	11.7	—	—	92
	T(A-TMAP)P苯萃取	pH4.7,HAc-NaAc缓冲液	—	433	16	(0~1.5)μg/5ml	合金	93
	T(4-PYR)P盐酸羟胺	pH=1.8~3.1	—	418	18	(0~6.0)μg/25ml	铜、铁、铝合金	94

续表

元素	显色剂	测定条件	组成比(M:L)①	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	应用	文献
Cu	$TMPPS_4$	pH＝4.4～5.9，HAc-NaAc	—	410	37	(0～1.4)μg/10ml	铝合金	95
	meso-四（对磺基苯基）卟啉	pH3.5，100℃热2min	1:1	413	45	(0～5)μg/50ml	板栗、核桃	96
	二苯碳酰二肼	NH_4OH+H_2O(1+19)，$CHCl_3$	—	540	15.0	(0～0.9)mg·L^{-1}	汽水、冰水、合金	97
	双(2,2′-联喹啉基)-苦味酸钠	pH6，$CHCl_3$	—	550	14.4	(0.04～0.3)mg·L^{-1}	盐、植物、水	98
	meso-四（4-甲氧基苯基-3-磺酸）卟啉	pH5.2，HAc-NaAc	1:1	410	37	(0～1.4)μg/10ml	合金、食品、水	99
	α,β,γ,δ-四(4-三甲铵苯基）卟啉(TAPP)	pH4.5，HAc-NaAc，盐酸羟胺，硫酸	—	413	25	—	人发	100
	间溴偶氮羧-*m*	pH＝2.8～3.2	1:2	710	11.1	(0～16)μg/25ml	人发	101
F	茜素络合剂-硝酸镧	pH4.5	—	620	1.4		水、食物、金属	102～104
Fe	5-Cl-PADAP	—	—	605	8.82	(0～20)μg/25ml	金属、合金	105
	2-(3,5-二氯-2-吡啶偶氮)-5-二甲氨基苯胺	—	—	570	84.3		铝、铝合金	106
	二安替比林苯乙烯甲烷(DAVPM)	Mn(Ⅱ)	—	540	144	(0.04～0.8)μg/25ml	天然水	107
	2-(2-噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯甲酸(TAMB)	乙醇，pH＝5.2～6.3，$(CH_2)_6N_4$-HCl	1:2	580	7.7	(0～12)μg/25ml	铝合金、人发	108
Ga	5-Br-PADAP	pH＝3.5～4.5	—	570	11.7	(0～25)μg/25ml	铝土矿、烟尘	109
	3,5-2Br-PADAP-丙酮	pH4	—	580	10	(0～10)μg/25ml	岩石	110
	5-Br-DMPAP	pH4.5	—	560	11.5	(0～10)μg/25ml	冶金产品	111
	乙基卡普里蓝	4mol·L^{-1} HCl，NaCl，苯-二氯乙烷(5+2)萃取	—	—	11	—	铜矿	112
Ge	槲皮素	盐酸	1:3	468	10.3	(0～5)μg/10ml	矿物	113
Hg	TAPP	pH＝9.8～11.0，40%乙醇	1:1	449	28.5	(0～20)μg/25ml	工业废水	114
I	IO_3^--KI CV 放大反应	$CHCl_3$ 萃取		580	25	(0.02～0.07)mg·L^{-1}	水质	115
IO_3^-	双硫腙	CCl_4	—	620	17	(0.175～6.15)μg/10ml	硝酸钾	116
In	邻苯二酚酞	酸性	—	560	13.5	(0～10)μg/25ml	—	117
	丁基罗丹明	苯或 MIBK-甲苯(2+3)，乙酸乙酯萃取	—	560	12.5	—	—	118～123
Ir	硫代米蚩酮(TMR)	稀 H_2SO_4，乙醇	—	460	566	(0.008～0.8)mg·L^{-1}	镀铱液	124
	4,4′-二(二乙胺基)二苯硫酮(BDTBP)	稀 HCl，乙醇	—	456		(0～0.4)μg·L^{-1}	铂、铑	125
Li	TMC-冠-甲臜	羟基四丁铵，丙酮	1:1	540	—	(0.03～0.3)mg·L^{-1}	地下水、血浆	126
	生色冠醚的二硝基苯偶氮酚	三乙醇胺，二甲基亚砜	—	565	4.3	(25～250)mg·L^{-1}		127
Mg	偶氮氯膦 I(CPA-I)	—	1:1	576～582	1.95	(0～15)μg/50ml	铝合金、锌合金等	128
	二溴羧基偶氮氯膦(DBA-CPA)	pH10.35，硼酸盐	—	618	2.4	(0～28)μg/50ml	铝合金	129
	直接蓝 49	pH10.9，NH_3-NH_4Cl	—	630	3.6	(0～12.5)μg/50ml	铝合金	130
Mn	5-Br-PADAP	pH8.5，水-乙醇	1:2	575	12.7	(0～10)μg/25ml	镁、铝合金、茶叶	131
	5,10,15,20-四(4-羧苯基)卟吩	—	—	469	9.97	—	茶叶	132
	2-(3,5-二氯-2-吡啶偶氮)-5-二乙氨基酚	pH＝9～9.5	—	570	12	(0～10)μg/25ml	矿石	133

续表

元素	显色剂	测定条件	组成比(M∶L)^○	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	应用	文献
Mn	5，10，15，20-四(4-甲氧基-3-磺酸苯基)卟啉	pH9.2	—	469	10.7	(0~10)μg/25ml	食品	134
Mo	3,4-二羟基偶氮苯	—	—	550	10.7	—	—	135
	对氯苯基荧光酮	—	—	525	13.7	—	—	136
	9-(3-吡啶基)-2,6,7-三羟基荧光酮	—	—	537	11.5	—	低碳钢、合金钢	137
NH_3	水杨酸	柠檬酸钠、亚硝酰铁氰化钠，次氯酸钠	—	697.5	—	(0.25~10)μg/10ml	空气	138
	二氯异氰尿酸钠	pH=5.5~6.5	—	690	—	(0.05~0.5)μg·g^{-1}	土壤	139
NO_2^-	氨基苯磺酸，α-萘酚	0.08mol·L^{-1}HCl	—	530	3.05	(0.16~4.9)mg·L^{-1}	—	140
	罗丹明 6G	—	—	445	1.2	(0~3)mg·L^{-1}	污水	141
	对硝基苯胺，*N*,*N*-二甲基苯胺	强酸性，重氮化；弱酸性，偶联 pH=0.16~0.28	—	505	5.29	(0~11)mg·L^{-1}	水	142
	品红、8-羟基喹啉	强酸性，重氮化；pH11，偶合	—	500	42.5	(0.2~6)μg/10ml	人体唾液	143
NO_3^-	*N*-1-萘乙二胺	H_2SO_4	—	545		<250μg	啤酒	144
NO_3^-，NO_2^-	邻苯氨基苯甲酸	—	—	560~565	10.7 (NO_3^-) 17.7 (NO_2^-)	(0.05~0.2)mg·L^{-1} (NO_3^--N) (0.03~0.15)mg·L^{-1} (NO_2^--N)	地表水	145
Nb	5-Br-PADAP	pH=1~4	—	610	6.05	—	铌合金、稀土矿	146~148
	2-(5-硝基-2-吡啶偶氮)-5-二乙氨基酚	—	1∶1	610	9.59	(0~50)μg/25ml	矿样	149
Ni	5-Br-PADAP	pH6	—	560	12.1	(0~15)μg/25ml	银、铜及其合金	150
	2-(2-噻唑偶氮)-5-二乙氨基苯甲酸	pH=4.2~5.7	1∶1	615	10.5	(0~14)μg/25ml	铝合金	151
	5-硝基吡啶偶氮二羧甲氨基苯酚	pH5.5，HAc-NaAc	1∶2	570	14.3	(0~19)μg/25ml	—	152
	2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5-二甲氨基苯胺	pH5.6，HAc-NaAc	1∶2	570	12.4	(0~0.4)mg·L^{-1}	铝合金	153
Os	γ-酸(7-氨基-1-萘酚-3-磺酸)	—	—	500	50.8	(0.5~4.0)μg/50ml	矿石	154，155
	8-氨基喹啉	pH3.62，HAc-NaAc	1∶3	590	13	(0~10)μg/10ml	合成样	156
P	钼酸盐	还原剂	—	660	8	(0~10)μg/100ml	硅铁、矿石、水、饲料等	157~161
Pb	α,β,γ,δ-四(4-三甲铵基苯基)卟吩	pH=9.5~12.5，$Na_2B_4O_7$-NaOH	—	459	23.5	(0~20)μg/25ml	岩石矿物	162
	meso-四(3，5-二溴-4-羟基苯)卟啉	8-羟基喹啉存在下	1∶2	479	24	(0~11)μg/25ml	铁矿、锌	163
Pd	5-Br-PADAT	—	—	580	15.0	(0.1~6)μg/10ml	矿物	164
	3,5-Br_2-PADAT-乙醇	—	—	600	10.5	(0.5~10)mg·L^{-1}	矿石	165
	3,5-Br_2-PADAP	—	—	590	10.6	(0~20)μg/25ml	钯催化剂	166
	α,β,γ,δ-四(4-三甲铵基苯基)卟啉	pH5	—	409	25	(0~0.4)mg·L^{-1}	—	167
	meso-四(4-羟基苯基)卟啉	pH4.5	—	420	23	(0~0.4)mg·L^{-1}	—	168
	5-(偶氮苯基)偶氮-8-氨基喹啉	pH=3.0~9.0，NaOH-H_3BO_3-KCl	—	694	11.1	(0~9.0)μg/10ml	催化剂	169
Pt	5-(对硝基苯偶氮)-8-(对甲基磺酰氨基)-喹啉	强碱介质	—	640	13.7	(0~25)μg/25ml	催化剂、渣	170
	5-Br-PADAT	(0.2~1.0)mol·$L^{-1}$$H_3PO_4$，正丙醇	1∶1	602	7.9	(0~25)μg/25ml	催化剂	171

续表

元素	显色剂	测定条件	组成比 (M:L)①	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	应用	文献
Rh	3,5-Cl_2-PADAT	—	—	525 575	10.0 19.0	(0.1～0.5)ng	—	172
	5-Cl-PADAT	—	—	575	17.1	(0～18)μg/25ml	催化剂残渣	173
	5-Br-PADAT	—	—	577	17.8	—	—	173
	3,5-Br_2-PADAT	—	—	590	17.6	—	—	173
	5-Br-PADAP	—	—	600	12.0	—	矿石	174
	硝磺偶氮Ⅲ	pH8.4	—	580	25	(0～6)μg/25ml	—	175
	2-(4,5-二甲基-2-噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯甲酸	pH=5.0～6.0	—	694	11.7	(0～10)μg/25ml	催化剂	176
	5-Br-PADMA	1.2mol·L^{-1} $HClO_4$	—	610	15.0	(0～0.56)μg/ml	催化剂	177
	噻唑偶氮-5-二乙氨基苯甲酸(TAEB)	pH=4.0～6.5	1:1	674	14.4	(0～20)μg/25ml	催化剂	178
Ru	*meso*-四(磺基苯)卟啉	pH=4.0～4.6	—		17.7	(2～12)μg/25ml	合成样	179
	α,β,γ,δ-四(4-三甲氨基苯基)卟啉	pH=3～4.2	1:1	436	52.5	(0～2.5)μg/10ml	矿样	180
S	Hg(Ⅱ)四(4-三甲铵苯基)卟啉	—	—	449	28.5	(0～10.8)mg·L^{-1}	工业废水	181
SO_2	盐酸副玫瑰苯胺	乙醇胺吸收	—	560	3.9	(1～10)μg/10ml	—	182 183
SO_4^{2-}	Ba^{2+},钍试剂 I	pH=4～5	—	550	12.4	—	水质	184
Sb	甲基绿	2mol·L^{-1} HCl,$CHCl_3$	—	645	2.5	(0～30)μg/10ml	金属铜、废水	185
Se	菲咯嗪铁(Ⅱ)	KBH_4 还原为 H_2Se	—	560	4.30	0.12μg/ml	土壤、水系沉积物	186
Si	钼酸盐、还原剂	(0.18～1.08)mol·L^{-1} H_2SO_4,赤霉素	—	810	3.51	(0～20)μg/25ml	钢铁	187
		抗坏血酸	—	815	2.57	(0～30)μg/50ml	电解金属锰	188
Sn	苯基荧光酮	—	1:2	510	7.7	—	金属、合金、矿石	189
		H_2SO_4	—	502	15	(0～20)μg/50ml	—	190
	槲皮素	(0.1～0.3)mol·L^{-1}HCl	—	450	4.0	(10～100)μg/50ml	铝锡合金	191
Sr	间溴偶氮羧-*m*	pH3.4	—	705	16	—	非稀土铝合金	192
	均三溴偶氮胂(TB-AVA)	0.48mol·L^{-1} HCl	—	620,505	6.86	—	花岗岩	193
Ta	乙基紫	(0.05～0.10)mol·L^{-1} H_2SO_4,NaF,乙酸乙酯萃取	1:1	588	11.8	(0～20)μg 水相,Ta_2O_5	钢铁	194
Te	丁基罗丹明 B	(4～6)mol·L^{-1} HCl,磷酸三丁酯(TBP)-苯萃取	—	540	6.4		二氧化硒	195
Th	偶氮胂(Ⅲ)	HCl 酸性,草酸	—	660	13		岩矿石、稀土、氧化物、水、食品	196～200
	对乙酰基偶氮羧-P	0.1mol·L^{-1}HCl	1:2	710	28	(1～18)μg/25mlThO_2	岩矿	201
	偶氮氯膦-mA	(0.06～0.18)mol·L^{-1}HCl	1:2	685	10.4	(0～20)μg/25ml	—	202
	偶氮硝膦-mN	1mol·$L^{-1}$$HNO_3$	1:1	670	10.4	(0～30)μg/25ml	水	203
	对甲基二溴偶氮胂	1.2mol·L^{-1} HCl	—	640	13.4	(0～30)μg/25ml	小麦、自来水	204
	多卤代变色酸双偶氮胂类,TC-偶氮胂	7.2mol·L^{-1}HCl	1:3	640	13.5		铀钍矿石	205

续表

元素	显色剂	测定条件	组成比(M:L)①	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	应用	文献
Th	三溴偶氮氯膦(CASA-TB)	(4.3~5.7)mol·$L^{-1}HClO_4$	—	645	13	(0~15)μg/25ml	钨钍合金	206
	三溴羧基偶氮膦	0.5mol·L^{-1} H_2SO_4	1:2	630	11.5	(0~50)μg/25ml	钨合金	207
Ti	3,5-Br_2-PADAP	pH=3.4~3.8,盐酸羟胺,氯乙酸	—	598	8.4	(0~18)μg/25ml	—	208
	4-(6-溴-2-苯并噻唑偶氮)邻苯二酚	40%丙酮,pH3.4	1:2	570	9.21	(0~13)μg/25ml	水、废水	209
Tl	亮绿	$Ce(SO_4)_2$或H_2O_2,甲苯或苯	—	640	10.3	(0.2~20)mg·L^{-1}	—	210
	乙基紫	0.1mol·L^{-1} HBr,MIBK或乙酸异戊酯	—	—	11	—	矿石、水、尿	211
	甲基绿	(0.05~0.5)mol·L^{-1}HBr,乙酸异戊酯	—	590	11.3	(0~10)μg/5ml	铟等	212
	维多利亚蓝BO	苯	—	625	11	—	—	213
U	偶氮胂Ⅲ	(4~8)mol·L^{-1} HCl	1:2或1:3	665 635	10	—	废水、锰矿等	214~218
	对乙酰基偶氮胂	3mol·L^{-1}HCl	1:2	675	9.5	—	化探样品	219
	2,6-二氯-4-溴偶氮胂	3mol·$L^{-1}H_2SO_4$	—	640	11	(0~22)mg·L^{-1}	废水、矿样	220
V	2-(4,5-二甲基噻唑-2-偶氮)-5-二乙氨基酚	pH=3.8~4.5,磷酸盐	1:1	620	4.1	(0~25)μg/25ml	食盐、污水	221
	二安替比林苯乙烯基甲烷	4.2mol·L^{-1} H_3PO_4	—	546	4.57	(0~12)μg/25ml	钢铁	222
W	2,6,7-三羟基-9-(对氯苯基)-3-荧光酮		—	532	24	—	—	223
	5-溴水杨基荧光酮	(0.08~0.8)mol·L^{-1}HCl	—	518	13.2	—	合金钢	224
Zn	5-Br-PADCAP	pH9.2,硼砂缓冲液	1:2	563.8	12.1	(0~20)μg/25ml	铝合金、富锌蛋	225,226
	5NO_2-PAR	pH=8.5~10	1:2	526	11.9	(0~25)μg/25ml	人发	227
	四(4-三甲铵苯基)卟啉	0.15mol·L^{-1} H_2SO_4,释放出显色剂	—	432	40	(0~1.7)μg/25ml	饮水、废水	228
		7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸催化,pH=5		422	40	(0~25)μg/25ml	食品	229
	四(2-羟基-5-磺酸苯基)卟啉	pH5.4,100℃热3min	1:1	420.5	35	(0~100)mg·L^{-1}	水	230
	四(对磺酸苯基)卟啉	pH4.5,100℃热5min		421	46	(0~5)μg/50ml	粮食	231
	四(4-甲氧基-3-磺酸苯基)卟啉	pH5.2,100℃热2min,8-羟基喹啉-5-磺酸催化	1:1	423.6	51.5	(0~2.0)μg/25ml	铝合金	232
	meso-四(4-羟基-3-磺酸苯基)卟啉	pH4.4,100℃热2min	—	423.8	40.9	(0~2.5)μg/25ml	食品	233
Zr	5-Br-PADAP-丙酮	pH=2.8~4.5	—	600	12.4	(0~24)μg/25ml	—	234
	偶氮氯膦Ⅲ	2mol·L^{-1} HCl,异戊醇	1:1	678	23.5	(0~4)μg/10ml	标钢	235
	4,4'-双(儿茶酚偶氮)联苯	pH=0.7~9	—	—	11	—	铜锆合金	236
	5-Br-PADAP	pH=3.5~5.8	—	—	15.4	—	锆英石	237

① M表示元素,L表示显色剂。
② phen—邻菲罗啉。

本表参考文献:

1 蔡维平等. 分析化学,1989;17(3):204
2 Mohite B S. Indian J. Chem,1979;18A(3):275
3 Pilipenko A T Ukr Khim Zh,1981;47:751
4 高惠芬等. 冶金分析,1988;8(6):49
5 田景锡,罗 辉. 理化检验(化),1995;31(2):174
6 赵秀峰. 理化检验(化),1992;28(5):309
7 刘绍朴,王 英. 冶金分析,1991;11(1):1
8 虞光禹. 冶金分析,1993;13(1):42
9 薛文泉. 分析化学,1993;21(9):1114
10 陈国珍等. 紫外-可见分光光度法(下). 北京:原子能

出版社，1987；36 页
11 Kin I S et al. Punsok Hwahak，1979；(3):33
12 张增瑞等．分析化学，1983；11:257
13 谭新民．分析化学，1985；13(11):855
14 孙国斌等．分析化学，1990；18(1):34
15 梁 果．桂林冶金地质学院学报，1989；9(3):926
16 黄桂芳等．冶金分析，1994；14(3):17
17 刘群珍等．分析化学，1979；7:43
18 戴建中等．理化检验（化），1981；17(2):13
19 胡忠仁．理化检验（化），1983；19(4):30
20 姚继扬等．分析化学，1981；9:246
21 余宪恩等．分析化学，1981；9:432
22 Пилипенко А Т и др. Зав. Лаб，1982；48:7
23 魏东霞．冶金分析，1982；(4):34
24 铁安年等．分析化学，1983；11:77
25 张宝文等．分析化学，1978；6(1):25
26 陈婷艳．安徽化工，1990；(1):40
27 王正之等．土壤肥料，1987；(2):47
28 Aznatez A J et al. Analyst，1984；109：183
29 孙 晞．冶金分析，1991；11(1):17
30 赵书林等．冶金分析，1990；10(2):13
31 宋观来，吴斌才．分析试验室，1988；7(9):12
32 宋观来，吴斌才．环境化学，1986；5(2):77
33 张正奇等．化学试剂，1988；10(3):133
34 栾树森等．分析测试通报，1988；7(4):49
35 高家隆等．化学学报，1985；43(8):771
36 杨代菱等．武汉大学学报（自），1986；(3):68
37 谢能泳等．化学试剂，1987；9(3):169
38 谢能泳等．冶金分析，1988；8(2):1
39 杨浩义．冶金分析，1990；10(6):16
40 谢能泳，胡华强，余席茂．冶金分析，1988；8(2):1
41 陈琬如，葛圣松，潘教麦等．理化检验（化），1988；24(4):194
42 任吉村，李善祥，熊少祥等．冶金分析，1989；9(4):22
43 谢能泳，胡华强，余席茂．化学试剂，1988；10(6):325
44 马冲先，吴 诚．分析化学，1989；17(6):530
45 张华山，黎心懿等．理化检验（化），1993；29(1):9
46 柯 樱等．理化检验（化），1994；30(2):96
47 肖惠祥．岩矿测试，1987；6(1):39
48 樊建芬等．分析试验室，1992；11(4):33
49 赵心伟等．兰州大学学报（自），1987；23(4):75
50 杨 其，钱 蜀．四川环境，1990；9(2):43
51 向红文，张亚丽等．地质实验室，1987；3(3):196
52 白秀荣．工业水处理，1987；7(1):45
53 章 瑛，阳 龙．分析试验室，1988；7(9):10
54 杜 昆，杨祖磐．冶金分析，1990；10(4):28
55 吴传礼，王中联．中华预防医学杂志，1990；24(2):128
56 耿荣华等．中国环境监测，1994；10(6):20
57 林小琪．环境工程，1994；12(6):42
58 崔瑞珍等．理化检验（化），1993；29(2):102
59 迟兴娴等．日用化学工业，1993；(1):42
60 潘教麦，凌亚庆，徐钟隽．理化检验（化），1990；26(5):259
61 杜迎翔，潘教麦，骆 丹等．理化检验（化），1992；28(2):85
62 杜迎翔，徐钟隽．理化检验（化），1991；27(3):132
63 Gajewska R et al. Rocz Panstw Zakl Hig，1980；31(2):169
64 王辅芳等．环境化学，1987；6(3):27
65 孙 沂等．分析化学，1986；14(12):917
66 张正奇等．湖南大学学报，1991；18(3):85
67 潘教麦等．理化检验（化），1993；29(3):138
68 Hiraide M et al. Bunsiki Kagaku，1982；31，E:269
69 Bakowski W et al. J Microchem，1984；29:137
70 秦文静．环境与健康杂志，1994；11(2):82
71 梁培德．理化检验（化），1989；25(6):328
72 王金甫．分析化学，1983；11:203
73 安兴民等．化学试剂，1984；6(3):188
74 程痂等．成都环保，1990；14(4):44
75 史美强等．上海环境科学，1991；10(2):34
76 霍克若．分析化学，1984；12(6):558
77 霍克若．分析试验室，1985；4(3):25
78 谢能泳等．武汉大学学报，1985；(1):85
79 张 光等．分析化学，1985；13(8):618
80 张 光等．陕西师大学报，1989；17(1):37
81 张 光等．理化检验（化），1990；26(4):219
82 于善琨等．海湖盐与化工，1990；19(3):48
83 吴其庄，王东进，黄泽兴等．冶金分析，1992；12(3):16
84 韩 权．青海师大学报（自），1991；(1):53
85 赵凤林，金 鹰，梁 颖等．分析化学，1992；20(1):23
86 韩 树，吴启勋．化学试剂，1992；14(4):241
87 徐秋云等．冶金分析，1993；13(6):47
88 杨 亢，陈远熹．分析化学，1991；19(1):92
89 徐理阮，李发美．化学试剂，1982；4(4):223
90 李晓明，韩 杨．化学试剂，1988；10(4):243
91 于京华等．分析试验室，1993；12(2):43
92 张贵珠，高 志，何锡文．分析试验室，1991；10(1):1
93 兰元英等．厦门大学学报（自），1991；30(3):333
94 徐勉懿等．分析试验室，1989；8(1):8
95 陈玉媛等．理化检验（化），1992；28(4):215
96 尹家元，徐其亨．云南化工，1990；(3):16
97 黄选忠．分析化学，1990；18(3):304
98 Morales A，Fresnius' Z. Anal Chem，1989；334(1):53
99 陈玉媛等．理化检验（化），1992；28(4):215
100 周明达，刘绍乾．理化检验（化），1993；29(3):182
101 邓桂春等．分析化学，1992；20(7):825
102 赵馨圃等．分析化学，1981；9:497
103 王淮俦等．中华预防医学杂志，1980；14:238
104 高桥武雄［日］编著．（吴景学等译）．水中超微量成分分析．北京：中国建筑工业出版社，1980；83 页
105 沈乃葵等．分析试验室，1987；6(7):8
106 韩 权，吴启勋．冶金分析，1992；12(6):14
107 张文德等．分析化学，1992；20(8):939
108 朱有瑜等．分析化学，1993；21(7):815
109 张荣灿等．分析试验室，1982；(1):37
110 吴润身．分析化学，1985；13(8):64
111 刘润平．化学试剂，1987；9(5):279
112 张旭芳等．痕量分析，1988；(1):62
113 程先忠等．岩矿测试，1989；8(1):21
114 潘祖亭等．分析化学，1986；14(11):841
115 Куркова Т Н и др. ЖАХ，1980；35:2341
116 高 琼，张华林等．分析试验室，1990，9(3):71
117 Mori I et al. Bull Chem Soc Jpn，1986；59(3):958
118 钱 程．理化检验（化），1990；26(2):80
119 吕安池等．分析化学，1981；9(3):347
120 江 瑜等．分析化学，1989；17(6):551
121 吴曼君．岩矿测试，1988；7(2):107
122 苑必成等．岩矿测试，1987；6(1):32
123 包宜道．分析测试通报，1986；5(3):42
124 姚凤姬等．痕量分析，1985；(3,4):158
125 姚凤姬等．化学通报，1985；(8):14
126 Ситикова Р В，Крылова А И. ЖАХ，1982；37(4):631
127 Nakashima K et al. Chem Lett，1982；131(11):1781

128 上海机械制造工艺研究所四室等. 理论检验（化），1979；(2):26
129 潘教麦等. 理化检验（化），1993；29(4):222
130 周德荣. 辽宁化工，1994；(1):53
131 魏复盛等. 分析化学，1981；9:345
132 Ishii H et al. Anal Chim Acta，1982；136:347
133 张　光，刘　彬，胡炎荣. 分析化学，1987；15(2):142
134 汤福隆，陈恒武，尚杨玉. 化学试剂，1991；13(2):86
135 若松義信. 分析化学（日），1980；29:472
136 黎心懿等. 冶金分析，1991；11(3):9
137 沈含熙等. 化学试剂，1991；13(3):129
138 汤利民等. 中国环境监测，1989；5(4):22
139 王　虹. 土壤通报，1992；23(4):188
140 Flamerz S et al. Analyst，1985；110:1513
141 蔡亚岐，胡之德. 化学试剂，1989；11(2):73
142 金尚德等. 环境化学，1992；11(3):75
143 孙胜梅等. 湖北工学院学报，1993；8(4):11
144 茅惠明. 临床检验杂志，1995；13(1):6
145 丘星初等. 环境科学，1992；13(4):63
146 王献科. 冶金分析与测试（分），1983；3(6):346
147 汪月高等. 冶金分析与测试（分），1984；4(4):62
148 周名成等. 冶金分析与测试（分），1984；4(6):13
149 张华山等. 化学试剂，1995；17(1):1
150 霍克若. 分析试验室，1987；6(2):67
151 杨合情等. 理化检验（化），1991；27(5):262
152 郑志全等. 化学试剂，1993；15(6):336
153 韩权等. 分析试验室，1994；31(2):34
154 叶奉官. 高等学校化学学报，1981；2:545
155 任鸿钧. 冶金分析，1983；(1):27
156 李玲颖. 高等学校化学学报，1994；15(1):27
157 吕六吉，王建英等. 山西化工，1987；(3):41
158 赵人琤，陈　蓓等. 营养学报，1989；11(2):156
159 卞光玉. 工业水处理，1988；8(3):43
160 李永生. 仪器仪表与分析监测，1990；(2):1
161 陈志锦. 冶金分析，1990；10(2):51
162 孙明英等. 岩矿测试，1986；5(1):26
163 吴怀孝，徐钟隽，潘教麦. 华东师大学报（自），1991；(1):60
164 马自诚等. 化学试剂，1985；7(1):17
165 黄慕球，廉廷肇. 分析化学，1983；11(9):660
166 徐勉懿等. 武汉大学学报（自），1983；(3):59
167 应勤等. 理化检验（化），1987；23(4):229
168 江明晶等. 理化检验（化），1988；24(5):277
169 杨桂法等. 分析试验室，1992；15(5):1
170 赵肆为等. 分析试验室，1991；10(5):17
171 朱有瑜等. 冶金分析，1995；15(2):16
172 屈义彬，陈海云. 分析试验室，1986；5(12):34
173 陈惠凤等. 分析化学，1986；14(4):300
174 巩玉珍等. 稀有金属，1983；7(2):53
175 李友芬. 理化检验（化），1989；25(2):85
176 张　光等. 冶金分析，1991；11(5):21
177 张　光等. 理化检验（化），1991；27(4):201
178 杨合情等. 分析化学，1992；20(6):725
179 纪翠荣等. 郑州大学学报（自），1989；21(1):71
180 罗扶中等. 分析化学，1994；22(1):1118
181 潘祖亭，徐勉懿等. 高等学校化学学报，1987；9(1):85
182 于水如等. 理化检验（化），1989；25(6):335
183 李鼎如等. 污染防治技术，1994；7(3):55
184 Jones E A. Anal Chim Acta，1984；156:313
185 顾永祚，高杰，潘杨. 分析试验室，1994；13(6):36
186 刘一真. 郑州大学学报（自），1993；25(1):70
187 沈乃葵等. 分析试验室，1985；4(10):62
188 殷新求等. 湖南冶金，1991；(5):41
189 陈国珍等. 紫外-可见分光光度法，下册. 北京：原子能出版社，1987，433页
190 姜雪英等. 微量元素与健康研究，1995；12(1):63
191 吴先进，李家华，赵红梅等. 分析试验室，1995；14(1):82
192 邓桂春等. 分析化学，1993；21(8):911
193 黄桂芳，田惠黄. 分析化学，1989；17(4):334
194 刘长松等. 分析化学，1984；12(8):733
195 包宜适. 分析测试通报，1985；4(4):1
196 钱安林等. 分析化学，1983；11:372
197 Victor A H et al. Anal Chim Acta，1982；138:285
198 刘静等. 理化检验（化），1981；17(6):27
199 欧阳辉. 放射性地质，1984；(5):57
200 周治发等. 分析测试通报，1985；4(3):18
201 黄桂芳等. 化学试剂，1985；7(2):109
202 滕光等. 分析试验室，1986；5(1):13
203 丘星初等. 中国环境监测，1987；3(5):4
204 黎心懿等. 分析化学，1988；16(1):92
205 陈怀侠等. 痕量分析，1989；5(3):33
206 郑晓晖等. 理化检验（化），1993；29(4):197
207 王建兴等. 冶金分析，1993；13(6):9
208 薛月霞，姚家瑜. 冶金分析，1990；10(1):26
209 韩　成，王镇浦，赵庆波. 分析化学，1991；19(5):581
210 Grogorowicz Z，Ciba J. Talanta，1981；28(11):805
211 范必成，程泽. 岩矿测试，1987；6(1):32
212 龙顺祥，欧祁宁，刘宁秋. 分析试验室，1985；1(11):64
213 Constantinescu C，Constantinescu G C. Rev Roum Chim，1980；25(9～10):1411
214 钟广涛. 分析化学，1979；7:106
215 Kuroda R et al. Fresenius' Z Anal Chem，1980；300:107
216 Baumann E W. Dupont Report DP-1560，1980
217 黄江明等. 冶金分析与测试（冶金），1985；5(5):18
218 吴铁民. 理化检验（化），1990；26(3):133
219 丁俐俐等. 岩石矿物及测试，1983；2(4):309
220 陈卫东等. 分析化学，1994；22(12):1223
221 江瑜等. 兰州大学学报（自），1986；22(1):69
222 毛卓懋等. 冶金分析，1986；6(5):4
223 王东进等. 化学试剂，1992；14(2):77
224 龙文清等. 分析试验室，1993；12(6):98
225 王莉红等. 冶金分析，1993；13(6):1
226 王莉红等. 杭州大学学报（自），1994；21(3):311
227 董　岩等. 化学试剂，1994；16(1):15
228 张文漫等. 分析化学，1985；13(10):769
229 沈若荃，俞嘒. 无锡轻工业学院学报，1990；9(2):40
230 陈秀华，毛雪琴，汤福隆. 化学试剂，1990；12(3):143
231 尹家元，徐其亨. 云南冶金（科），1991；20(4):50
232 汤福隆，毛雪琴，尚杨玉. 化学试剂，1990；12(6):338
233 毛雪琴，汤福隆. 分析试验室，1991；10(3):65
234 邵光玓. 分析化学，1984；12(5):401
235 兰蔚等. 冶金分析与测试（分），1984；4(2):12
236 Л Н Савацкина идр. ЖАХ，1982；37(5):845
237 G V Rthaiah et al. Talanta，1988；35(6):502

表 16-2 稀土元素（RE）测定的二元显色体系吸光光度法

稀土元素包括钪、钇和15个镧系元素。根据稀土元素的电子层结构及由此而来的物理、化学性质，分为铈组稀土（轻稀土）和钇组稀土（重稀土）。铈组（Ce组）包括镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕，钇组（Y组）包括钆、铽、镝、钬、铒、铥、镱、镥、钇。但在地球化学和矿物化学上，通常将铕划在钇组

试　剂	测定元素	条　件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$(络合比)	应　用	文 献
偶氮胂Ⅲ	ΣRE①	pH2.8	650	4.5～7.1(1∶1)	食品、钢铁、矿石、铸铁、玻璃	1～7 8
对乙酰基偶氮胂	La～Sm②	pH=2.0～2.5	670	10.3～11.6(1∶2)	钢铁、高温合金、矿石、农作物、毛皮及催化剂	8～16
对溴偶氮胂	La～Nd	pH4.7	713	26.2～35.3(1∶2)	混合稀土、粮食	17～21
间溴偶氮胂	ΣRE	pH=3.2～4.5	654～666	9.0～10.6(1∶2)	土壤、水、低合金钢	22,23
二溴-氯偶氮胂(DBC-偶氮胂)	Ce	1.7mol/L HCl	630	12.9(1∶3)	高温合金	24
三溴偶氮胂	ΣRE	pH3.2	630	7.6～11.2(1∶2)	粮食、人发、水、铁矿	25～29
	La～Sm	(0.1～1)mol·L^{-1}HCl	630	12.0～13.7(1∶2)	植物、动物、毛皮、钢铁、有色金属、岩石、矿物、纯铈、纯铀	30～35
三氯偶氮胂	ΣRE	pH3.0	630	9.4～13.4(1∶2)	水	36
	La～Nd	pH1.3	630	10.8～13.1(1∶2)	水、球铁	36,37
二溴磺酸偶氮胂(DBS-偶氮胂)	La～Sm	0.32 mol·L^{-1} HCl	630	10.6～12.3	铝合金、镍合金、镁合金	38
偶氮氯膦Ⅲ	ΣRE	pH1	677	5.5～8.4(1∶1)	钢铁、球铁、磷灰石、颜料	39～42
	ΣRE	(0.008～0.33)mol·$L^{-1}H_2SO_4$-乙醇(>45%)	655	11.4～19.2(1∶3)	钢铁	43
	Y	0.2 mol·L^{-1} HNO_3-40%乙醇	670	12.0	铁、铝、铜、镍合金	44
	Gd	pH1	640		金基合金	45
间硝基偶氮氯膦(偶氮氯膦-mN)	ΣRE	pH1.8	670	7.8～8.2(1∶2)	矿石、钢铁、有色合金	46～50
	ΣCe	pH1.7	666	7.8～8.2(1∶3)	矿石	51～53
间乙酰基偶氮氯膦(偶氮氯膦-mA)	ΣRE	pH=1.2～2.5	665	8.0～10.0(1∶4)	钢、低合金钢、岩矿	54～60
对马尿酸偶氮氯膦	ΣRE	0.1 mol·L^{-1}HCl	680	7.2～10.2	混合稀土、人发、土壤	
间(对)甲酰基偶氮氯膦	ΣRE	0.1 mol·L^{-1}HCl	665～670	9.3～10.0		
	Gd～Lu	pH=3.0	696～698*	12.5～13.0	球铁	61
对碘偶氮氯膦	ΣRE	0.2mol·L^{-1} HCl	676～686	9.7～10.8(1∶2)	土壤、钢铁	62～64
对硝基偶氮氯膦(偶氮氯膦-pN)	Y	0.1 mol·L^{-1}HCl	730*	7.4	镍基合金	65
	ΣRE	pH=1.5～3	670～680	(1∶3)	钛合金、矿石	66,67
间磷酸基偶氮氯膦	ΣRE	(0.1～0.2)mol·L^{-1}HCl	685～690	8.9～9.8	混合稀土	68
	Yb,Y	pH=3.4～4.0	745～775*	6.9		
间三氟甲基偶氮氯膦(ΣCe)	ΣCe	pH1	670	8.0(1∶2)	钢、铁基、铝基合金	69,70
间磺酸偶氮氯膦	ΣRE	pH1.5	653～655	8.3～10.0(1∶2)	球铁、钨铈合金	71,72
磺胺偶氮氯膦	ΣRE	0.2mol·L^{-1} HCl	670	8.1～10.3	土壤	73
对兴多偶氮氯膦	ΣRE	1.0mol·L^{-1} HNO_3	665	7.2	混合稀土	74
对(间)氯磺酰基偶氮氯膦	ΣCl	(0.1～0.2)mol·$L^{-1}HNO_3$	670	9.6	铝合金	75
间羧基偶氮氯膦(偶氮氯膦-mC)	Sc	pH1.0	760	4.5(1∶3)	钨制品	76
三溴偶氮氯膦	ΣRE	0.1mol·L^{-1}HCl	650	10～12.4(1∶2)	土壤	77
三氯偶氮氯膦	ΣRE	0.4mol·L^{-1}HCl	641～644	8.6～11.7	有色金属、合金	78

续表

试剂	测定元素	条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$(络合比)	应用	文献
间乙酰基偶氮硝膦(偶氮硝膦-mA)	ΣCe	0.9mol·L^{-1} H_3PO_4	660	7.5	球铁、高合金钢、特种钢	79
间硝基偶氮硝膦(偶氮硝膦-mN)	—					80
对硝基偶氮溴膦(偶氮溴膦-pN)	ΣRE	(0.08～0.32) mol·$L^{-1}HNO_3$	690	7.5	地质样品	81
对磺酸硝基偶氮溴膦(偶氮溴膦-pSN)	ΣRE	(0.08～0.56) mol·$L^{-1}HNO_3$	669	9.1		82
半二甲酚橙	Sc	酸性	530	2.27		83
二甲酚橙	Sc	pH4.5	540	—	地质和环境物料	84
PAN	Sc		545	1.9		85
5-Br-PADAP	Sc		572	7.2		86
TAN	Sc		570	2.93		87
对硝基偶氮氯膦		0.5mol·L^{-1} HNO_3	678	2.16	钛铁	88
2-(4-Br-2-膦酸基苯偶氮)-7-(4'-磺胺苯偶氮)-1,8-二羟基-3,6-萘二磺酸(BPA-PNS)		(0.075～0.40) mol·L^{-1}HCl	715	10.6	地质样品	89
二溴偶氮胂	ΣRE	pH3.1	630	10～11(1:2)	粮食、奶粉、催化剂、矿石	90～93
二溴一氯偶氮胂(DBC-偶氮胂)	ΣRE	(1～2)mol·L^{-1} HCl	630	13(1:2)	铁矿	94
	ΣCe	1.2mol·L^{-1}HCl	640	9.6～11.6	球铁	95
	La、Ce				水、矿石	96,97
	Y	pH3.0	635～640	10.8～11.6	二元镁合金	98
二溴一氟偶氮胂(DBF-偶氮胂)	ΣCe	1.5mol·L^{-1}HCl	630	12.8	钛合金	99
二溴一甲基偶氮胂(DBM-偶氮胂)	ΣRE	pH=1.6～2.8	633～636	10.1～13.8(1:2)	小麦及铝合金	100
	ΣCe	3mol·L^{-1}HCl	632	13.0～14.5	钢铁、合金	101
三氯偶氮胂	ΣRe		630	10.3～10.9	铸铁、低合金钢	102
二氯磺酸偶氮胂(DCS-偶氮胂)	ΣRE	pH=3.0～3.3	630	10.0～13.0(1:2)	牧草、矿石、水	103～105
二溴偶氮胂	ΣRE	pH1.8	640	11.8(1:4)	人发	106
二溴磺酸偶氮胂(DBS-偶氮胂)	ΣCe	(0.24～0.4) mol·L^{-1}HCl	630		钛合金	107
	ΣRE	0.18mol·L^{-1} HCl	630	13.3	黑钨矿	108
	La(Ce),Gd(Y)	pH3	635,640	11.0～12.3	镁	109～112
对马尿酸偶氮氯膦	ΣRE	0.2mol·L^{-1}HCl	680	7.2～10.2(1:2)	土壤及水、矿石、铝合金、钢铁	113～116
二溴一氯偶氮氯膦(偶氮氯膦-DBC)	ΣRE	(1.2～1.4)mol·L^{-1}HCl	640～649	10.0～12.4	铝合金、铜合金、锌合金及岩石、钢铁、耐磨铜合金	117～119
二溴一硝基偶氮氯膦(偶氮氯膦-DBN)	ΣCe	0.4mol·L^{-1}HCl	642	10.8～10.9(1:3)	低合金钢、玻璃、陶瓷、镍基合金、铝钛锆铈	120～124
三溴偶氮氯膦	ΣRE	0.08mol·L^{-1} HCl	642～650	11.0～12.0(1:2)	钢铁	125
对(间)二氯甲基偶氮氯膦	ΣRE	(0.1～0.2)mol·L^{-1}HCl	659～668	10.0～12.9	铝合金	126,127
对氯偶氮氯膦(偶氮氯膦-pCl)	ΣRE	0.16mol·L^{-1} HCl	665		钢铁	128
对碘偶氮氯膦(偶氮氯膦-pI)	ΣRE	0.1mol·L^{-1}HCl	680	9.7～10.8	钢铁	129
间硝基偶氮氯膦(偶氮氯膦-mN)	ΣRE	0.08mol·L^{-1} HNO_3	—	—	镍硅	130

续表

试　剂	测定元素	条　件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$(络合比)	应　用	文献
间羧基偶氮氯膦(偶氮氯膦-mK)	ΣCe	0.1～0.15mol·$L^{-1}HClO_4$	—	—	不锈钢	131
对磺酸硝基偶氮溴膦(偶氮溴膦-pSN)	ΣCe ΣRE	0.12mol·L^{-1} HCl HCl	662 672	— —	矿石 龙南矿	132,133
间硝基偶氮硝膦(偶氮硝膦-mN)	ΣCe		670	—	钛合金	134
偶氮胂Ⅱ	Ce(Y) La	pH=3.1～3.5 pH=3.1～3.5	610 655	— —	焊条(硅锰型) La0.01μg·ml^{-1}	135 136
偶氮胂Ⅰ	ΣRE	0.01mol·L^{-1} HCl	570	—	矿物	137
偶氮氯膦-pCl	Y	pH4.5	746	15.6	一定量轻稀土存在下	138
偶氮硝膦-pN	Y	(1.2～1.5)mol·L^{-1}HCl	710	6.7	少量铈存在下	139
偶氮氯膦Ⅱ	Y	pH1.8	740	—	稀土镁合金	140
偶氮胂Ⅱ及偶氮氯膦-mA(双显色体系)	Y	pH2.6	651,678(双波长)	—	混合稀土	141
偶氮氯膦-mA	Sc	0.3mol·L^{-1}HCl	715	8.9	矿样	142
偶氮氯膦-pCl	Sc	pH2(HNO_3) 0.56mol·L^{-1} HCl	762 735	15.4(1:1) 6.8(1:2)	存在镧系元素、矿石 矿石	143,144 145
偶氮溴膦-pSN	Sc	(0.075～0.40)mol·L^{-1}HCl	715	10.6	地质样品	146
对马尿酸偶氮氯膦	Sc	pH=2～3	687	7.8	岩石、矿物	147
偶氮氯膦-mK	Sc	(0.12～0.48)mol·L^{-1}HCl	665	4.0(1:2)	矿石	148
偶氮氯膦-萘二磺酸	Sc	(0.24～1)mol·L^{-1}HCl	697	4.16(1:2)	等量镧系元素	149
二甲酚橙	Sc	pH1.5	550	—	含钪复杂氧化物	150
甲基百里酚蓝	Sc	pH=2.5～3.5	615	25.0(1:1)	高温氯化尘渣	151
三溴偶氮胂	铈组稀土 RE RE RE,Th,Zr	(1.0～1.6)mol·L^{-1}HCl pH3.2HCl-NaAc pH3.2HCl-NaAc	642 638 630	11.5 —	矿石 硅铝合金 磷矿 蚕茧，蛹	152 153 154 155 156
二溴一氯偶氮胂(DBC-偶氮胂)	铈组稀土	1mol·L^{-1}HCl	630	8～12	钢铁，有色金属	157
二溴羧基偶氮胂	铈组稀土 铈组稀土 铈组稀土	2.9mol·L^{-1}HCl 1.2mol·L^{-1}HCl 1mol·L^{-1}HCl	634 632 632	12～13 14 14	土壤 钢铁	158 159 160
二溴磺酸偶氮胂(偶氮胂-DBS)	—	0.48mol·L^{-1} HCl	640	14.8	钢铁	161
对甲基二溴偶氮胂(DBMA)	RE 铈组稀土	0.1mol·L^{-1} HNO_3 3mol·L^{-1}HCl	635 632	—	钢铁有色金属	162
对硝基偶氮氯膦(偶氮膦-pN)	钇组稀土	0.08mol·L^{-1} HCl	735	6.2～9.3	矿石	163
二溴一氯偶氮氯膦(DBS-偶氮氯膦)	RE RE 钇组稀土 (Nd)RE	1.9mol·L^{-1} H_2SO_4 1mol·$L^{-1}H_2SO_4$	655 655	6.1	铝合金 钢中夹杂 高速钢 铝	164 165 166 167
二溴磺酸偶氮氯膦(DBS-偶氮氯膦)	RE	0.06～0.16mol·L^{-1}HCl 0.7mol·L^{-1} H_3PO_4	645 645～655	9.5～10.2	铁矿石 金，铂，镍，铜	168 169

续表

试剂	测定元素	条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$(络合比)	应用	文献
二溴氯偶氮氯膦(DBF-偶氮氯膦)	RE	—	641～648	—	铜合金,球铁	170
二溴硝基偶氮氯膦(DBN-偶氮氯膦)	RE	—	640	10.7～10.9	钢铁	171
三溴偶氮-5-溴膦	铈组稀土	0.4mol·L^{-1} $HClO_4$	638	13		172
对磺胺偶氮溴膦(偶氮溴膦PSN)	Sc	0.1mol·L^{-1}HCl	715	10.5	球铁 地质样	173 174
对硝基偶氮溴膦(偶氮溴膦pN)	铈组稀土 Sc	HCl-丙酮 0.5mol·L^{-1} HNO_3	660 678	8.6 2.16	合成样 钛铁基体	175 176
对溴偶氮羧-Ⅱ	RE	pH=1.5～3.5	720～725	24～37	铝合金	177
二氯-氟偶氮氯膦(DCF-偶氮氯膦)	RE	2mol·L^{-1}HCl	640～647	5～12	铅锡合金	178
间乙酰基偶氮氯膦(偶氮氯膦-mK;偶氮氯膦-mA)	铈组稀土 Y(RE)	pH=1.1～2.2 0.05mol·L^{-1} H_2SO_4	660 660	7	土壤植物 YBaCu膜	179 180
对乙酰基偶氮氯膦(偶氮氯膦-pA)	RE	0.18mol·L^{-1} HCl	667	—	钢铁	181
对溴偶氮溴膦(偶氮氯膦-pB)	Y	(0.04～0.12) mol·L^{-1}HCl	700	—	镁合金	182
磺胺偶氮氯膦	RE		664	—	钢中固溶稀土	183
对氯偶氮氯膦(偶氮氯膦-pC)	Sc(RE) Sc Y	(0.14～0.18) mol·L^{-1}HCl 0.04mol·L^{-1} HNO_3	665 720,800	—	矿石	184 185 186
对溴偶氮氯膦(偶氮氯膦-pB)	Sc	0.16mol·L^{-1} HCl	740	7	岩矿	187
偶氮胂Ⅲ	Sc	pH2 KCl-HCl	675	—	钛白,钨渣	188
	RE	0.1mol·L^{-1}HCl	610		焊接样	189
	RE	pH=2.9～3	660		镁硅合金	190
	RE	pH=2.9～3	660		磷灰石,精矿	191
	La	pH=3.1～3.5	655			192
	Ce	液膜富集				193
	RE		650		不锈钢	194
偶氮氯膦Ⅲ(CPAⅢ)	Ce(RE) Sc	(0.1～0.2)mol·$L^{-1}HNO_3$ pH=1～5	623,679 770	—	铜锡合金	195 196
偶氮胂Ⅰ	RE	pH=5～6	570	—	矿物	197
甲基百里酚蓝	RE	pH6.5	610	1.2～20		198
2-羟基-2-萘酸偶氮	RE	pH=7～8				199
4-(6-羟基-*m*-甲苯基亚肼基)-3-甲基-1-苯基吡唑啉酮-5-氯代磺酚S	Yb(RE) Sc	pH6 pH2 氯乙酸	520 650	0.2 1.8	钪钛铁矿	200 201
三溴氯磺酚	Sc	pH3.5	640	2.78	矿石	202,203
6-溴代-4-(2-噻唑偶氮)间苯二酚	单一稀土	—		—		204
羟基-3-苯基-1-(*o*-羟基苯基)三氮烯	RE	pH=5.4～6.7	405	0.7		205
o-ClPF	Ce		545	8.62		206

续表

试　剂	测定元素	条　件	λ_{max}/nm	ε/10^4(络合比)	应　用	文献
对乙氧基二溴偶氮氯膦	RE	0.1mol·L^{-1}HCl	655	9.4～13.7	低合金钢、铝合金	207
对乙氧基二溴偶氮胂	铈组稀土	2mol·L^{-1}HCl	655	11.7～12.6	钢铁、铝合金	208
二溴羧基偶氮氯胂	铈组稀土	0.6mol·L^{-1} $HClO_4$	—	13		209
偶氮胂Ⅲ	RE	P204萃取分离	—	—	高纯钍	210
	Sc	PMBP-石蜡 pH2.8萃取，1.2mol·L^{-1}HCl反萃	—	—		211
	RE	含56%乙醇，pH=0.8～1.5	650	8.1～12.6	岩石	212
	RE	717阴离子交换树脂相测定	663	9.7～15	模拟黄河矿	213
	RE	二安替吡啉甲烷-1-三元络合物萃取分离	—	—	高温合金	214
三溴偶氮胂	La,Ce,Pr	1.2mol·L^{-1}HCl	630	14.8	测组成等	215,216
	Ce,RE	HCl-草酸介质	630	—	铁铬系催化剂	217
	RE	树脂相双波长法	650,740	—	稀土矿	218
	RE	1.2mol·L^{-1}HCl	630	13	铜合金	219
	铈组	(0.15～0.9)mol·$L^{-1}$$HNO_3$	630	13.1	铜合金	220
	Sc	pH1树脂相测定	648,720	—		221
	可溶RE	pH4.8乙酸钠浸取	—	—	土壤	222
对乙酰基偶氮胂	RE	pH2.3 HCl-NaAc	670	—	矿渣	223
DBM-偶氮胂	铈组	H_2SO_4-H_3PO_4介质	632	—	高温合金	224
4-甲基偶氮胂-TB	RE	0.04mol·L^{-1} H_3PO_4	644	—	球墨铸铁	225
二溴羟基偶氮胂	RE	0.6mol·L^{-1} HNO_3	622	26	钢铁	226
二溴磺酸偶氮胂	铈组	(0.15～0.9)mol·$L^{-1}$$HNO_3$	635	12	铜锌铝合金	227
对甲基二溴偶氮胂	铈组	3mol·L^{-1}HCl	632	12	高温合金	228
偶氮氯膦Ⅱ	Sc	PMBP萃取分离	630	1.18	钒钛磁铁矿	229
	可溶RE	CTMAB三波长光度法	703,723,743		土壤	230
CPA-pN	Sc	离子交换，PMBP分离	680	5.03	钛氧化烟尘	231
	铈组	0.29mol·L^{-1} H_2SO_4	680	7.5	铜基合金	232
三溴偶氮氯膦	RE	NO_3型阴离子树脂相	660	—	麦饭石	233
	RE	PMBP，TOPO萃取分离	643	—	核工业废液	234
	RE	H_3PO_4-$H_2C_2O_4$-乙二醇	643	—	高放废液	235
对氯偶氮氯膦	Yb	pH4.5NaAc介质中	747	18.2	锌镀层	236
间氯偶氮氯膦	RE	(0.05～0.4)mol·L^{-1}HCl	675	7.5～10	钢铁	237
二溴硝苯偶氮氯膦	Ce	0.8mol·L^{-1} $HClO_4$	640	11	锌合金	238
对溴偶氮氯膦	La	pH1.5	—	—	测组成等	239
间硝基偶氮氯膦	La～Y	—	—	—	共显色	240
偶氮溴膦-pSN	Y	0.08mol·L^{-1} HCl	712	9.45	钢铁	241
邻氯苯基荧光酮	Sc	CTMAB pH6	560	12.1		242

续表

试　剂	测定元素	条　件	λ_{max}/nm	ε/10⁴(络合比)	应　用	文献
铬天青 S	Sc	Phen-Zn pH=5.6～6.1	630	2.98		243
3-(4 甲酰苯苯偶氮-4,5-二羟基-2,7 萘二磺酸-聚乙烯醇	Sc	pH7.4,40%乙醇	590	5.28		244

① 全部稀土元素。

② 表示测定元素的范围是从 La 到 Sm。以下类似表示其他的元素意思相同。

本表参考文献：

1 苏德昭等.营养学报,1982;4:163
2 I Janousek Chem. Listy,1982;76:975
3 Dang Dink An et al. Tap Chi Hoa Hoc,1983;21:10
4 Knyazeva D N et al. Zaved. Lab. 1982;48:16
5 罗绥明.冶金分析与测试,1985;5(2)：25
6 沈葵．理化检验（化），1984；20(6)：44
7 M D Nesterova et al. Zavod. Lab.，1986；52(2)：8
8 曾云鹗等．理化检验，1982；18(5)：8
9 朱吕田等．武汉大学学报，1984；(2)：71
10 朱吕田等．分析试验室，1984；3(1)：33
11 兰蔚．理化检验，1985；21(5)：261
12 刘万昌等．冶金分析．1982；7：27
13 肖志斌．化学试剂，1985；7(4)：232
14 何久康等．冶金分析与测试（分），1985；5(2)：10
15 谢格波等．环境化学．1984；3(6)：66
16 吴法先．稀土，1984；(1)：60
17 曾云鹗等．分析化学．1983；11：499
18 曾云鹗等．分析试剂，1983；5(1)：1
19 梁汉琼等．化学试剂，1983；5(1)：4
20 曾云鹗等．科学通报，1982；27：1243
21 李万选等．分析测试通报，1984；3(4)：44
22 曾云鹗等．分析化学，1984；12(1)：37
23 曾云鹗等．分析化学，1983；11(7)：499
24 曾云鹗等．分析化学，1985；13(9)：651
25 李万选等．分析测试通报，1985；4(6)：37
26 蔡汝秀等．高等学校化学学报，1985；6(2)：120
27 李万选等．环境化学，1985；4(4)：57
28 白继昌等．痕量分析，1985；(1)：59
29 何久康等．分析试验室，1986；5(2)：64
30 李万选等．应用化学，1984；1(3)：59
31 李万选等．化学试剂，1985；7(3)：173
32 吴法先等．分析试验室，1985；4(11)：21
33 吴法先等．冶金分析与测试（分），1984；4(6)：6
34 胡有云等．分析试验室，1986；5(3)：61
35 程介克等．武汉大学学报（分析化学专刊），1985；43
36 曾云鹗等．高等学校化学学报，1985；6(5)：397
37 李善祥等．冶金分析与测试（分），1985；5(6)：20
38 罗庆尧等．分析化学，1984；12(11)：985
39 赵俭．冶金分析与测试（分），1985；5(6)：54
40 肖满田．球铁，1984；(3)：43
41 吴世芬．冶金分析与测试（分），1984；4(5)：58
42 邹致君等．理化检验（化），1986；22(2)：111
43 刘绍璞．分析化学，1984；12(6)：508
44 郭采文等．分析试验室，1985；4(2)：60
45 庞纪士．冶金分析与测试（分），1984；4(6)：18
46 胡有云．理化检验（化），1984；20(3)：7
47 李先春等．化学试剂，1983；4：327
48 郭茂兴等．分析化学，1983；11：775
49 王素州．分析试验室，1983；2(5)：58
50 吴诚等．分析试验室，1983；2(5)：8
51 胡有云．岩矿测试，1982；1(3)：71
52 陈达仁等．分析化学．1983；11：617
53 虞承伟等．地质实验室，1986；2(1)：14
54 尹香莲等．中国科学技术大学学报，1984；14(4)：568
55 史汉文．理化检验（化），1984；20(5)：46
56 吴法先．冶金分析，1983；(1)：16
57 陈达仁等．分析化学，1982；10：738
58 曾云鹗等．J. Less-Common Metals，1983；94：271
59 李清香等．中国稀土学报（稀土卫生毒理学专辑），1985；117
60 白继昌等．分析试验室；1986；5(3)：21
61 曾云鹗等．化学试剂．1982；4(1)：1
62 史广昭等．武汉大学学报，1983；(1)：43
63 史广昭等．武汉大学学报（分析化学专刊），1985；37
64 邝平先等．中国科学技术大学学报，1985；15(3)：299
65 王文智等．分析化学，1983；11：913
66 施永琴等．冶金分析与测试（分），1984；4(3)：22
67 叶年咏．岩石矿物及测试，1984；3(1)：86
68 陈震华等．化学试剂，1982；4：342
69 黎心懿等．冶金分析，1983；3：209
70 周执明等．分析化学，1985；13(4)：289
71 马水福等．杭州大学学报，1982；9(3)：306
72 何　艺等．分析试验室，1985；4(9)：25
73 曾云鹗等．理化检验（化），1984；20(1)：4
74 刘恒橡等．理化检验（化），1985；21(3)：137
75 陈震华等．化学试剂，1985；7(1)：6
76 宋时来等．冶金分析与测试（分），1985；5(2)：1
77 黎心懿等．武汉大学学报（分析化学专刊），1985；30
78 余席茂等．化学试剂，1985；7(3)：143
79 刘恒橡等．分析化学，1983；11(6)：418
80 刘恒橡等．化学试剂，1985；7(1)：1
81 杨丽华等．岩石矿物及测试，1985；4(2)：177
82 吴斌才等．华东师范大学学报，1985；(4)：73
83 Hafez M A H, Kenawy I M M, Kabil M A. Anal Lett，1985；18(A16)：2043
84 Agrawal Y K. Nagar A K.（Indian）J Chem，Sect A，1989；25A(11)：1065
85 Sharma C D, Nagarkar S G, Eshwar M C. Bull Chem Soc Jpn，1986；59(5)：1662
86 Rathaiah G V, Eshwar M C,（Indian）J Chem，Sect A，1986；25A(1)：101
87 Sharma C D, Nagarkar S G, Eshwar M C. Bull Chem Soc Jpn，1986；59(5)：1662
88 宋现来，吴斌才．理化检验，1989；25(6)：350
89 刘志明，乐秀毓．分析化学，1990；18(1)：78
90 李清娟，严瑞娣．稀土，1988；(2)：45
91 何久康，代秋波．内蒙古大学学报，1988；19(3)：511
92 刘厚生，朱雪莲．石油化工，1986；15(4)：248
93 关秀云．云南冶金，1989；18(1)：36
94 何久康，其木格．岩矿测试，1988；7(3)：207
95 李善祥，朱德麟，汪崧发．理化检验（化），1988；24(1)：36

96 李善祥，任吉存．分析试验室，1988；7(3)：53
97 吴凤翔，邓爱华．理化检验（化），1989；25(1)：35
98 朱利亚．吴瑞林．冶金分析，1988；8(4)：51
99 杨 屹，蔡汝秀，曾云鹗．冶金分析，1988；9(2)：17
100 黎心懿，张华山，崔剑川．高等学校化学学报，1988；9(7)：661
101 张华山，梁 毅．中国稀土学报，1989；7(2)：86
102 王立美，张宋华，文庆珍．分析试验室．1986；5(12)：59
103 何久康，李北罡．分析化学，1988；16(8)：719
104 黄林芳，张 慧．岩矿测试，1987；6(2)：85
105 杨泉生，聂基兰，章 兴．江西大学学报，1986；10(3)：86
106 蔡汝秀，王丽莎，程 莉．理化检验（化），1988；24(1)：2
107 许敬英．理化检验（化），1987；23(5)：279
108 吴凤翔．岩矿测试，1988；7(1)：21
109 吴瑞林，朱利亚．贵金属，1988；9(4)．46
110 吴瑞林，朱利亚．冶金分析，1988；8(2)：32
111 吴瑞林，朱利亚．痕量分析，1987；3(1～2)：72
112 吴瑞林，朱利亚．理化检验（化），1988；24(1)：38
113 白继昌，高湘松，马惠昌．痕量分析，1985；1(3～4)，139
114 袁奇华，李庸华，周丽华．湿法冶金，1988；(1)：74
115 罗 斌，张晓梅．理化检验（化），1987；23(5)：286
116 戴豪谦，郭茂兴．分析化学，1986；14(9)：667
117 任 英，高 志，张佩勋．分析化学，1987；15(9)，792
118 谢能咏，朱纯金，余席茂．冶金分析，1989；9(2)：24
119 张佩勋，任 英．痕量分析，1987；3(1～2)，63
120 戴萍祁，罗庆尧，余席茂．化学试剂，1987；9(3)：138
121 潘教麦，欧忠平，吴 岚．冶金分析，1987；7(6)：11
122 潘教麦，欧忠平，刘秀兰．理化检验（化），1988；24(2)：7
123 欧忠平，潘教麦，徐钟隽．分析化学，1989；17(3)：239
124 何 芝，潘教麦，欧忠平．冶金分析，1989；9(2)：15
125 黎心懿，陈怀震．冶金分析，1987；7(5)：19
126 张华山，徐京龙．中国稀土学报，1988；6(4)：89
127 张华山，张 勇．分析试验室，1988；7(8)：1
128 潘教麦，杨 茹，徐钟隽．冶金分析，1989；9(3)：5
129 戴豪谦，郭茂兴．冶金分析，1987；7(1)：71
130 林岱彬．理化检验（化），1989；25(1)
131 张 远．理化检验（化），1988；24(5)：303
132 李春兰，申 云．岩矿测试，1988；7(1)：6
133 李先春．分析化学，1988；16(4)：封3
134 施水翠．分析化学，1987；15(11)：107
135 Gusey V I et al. Zavod Lab，1989；55(2)：23
136 Kharzeeva S E et al. Zavod Lab，1989；55(1)：27
137 Merisov Yu I et al. Zavod. Lab.，1988；54(9)：12
138 陈婉如，潘教麦，吴 铮．化学试剂，1986；8(4)：238
139 林君宓，沈丽莉，刘恒椽．分析测试通报，1989；7(4)，43
140 许敬英，李 平．分析化学，1988；16(1)：91
141 李金和，韩 超，马仁礼．分析试验室，1988；7(2)：25
142 胡有云，黄德敏，吴 戌．岩矿测试，1988；7(1)：15
143 Chen W et al. Mikrochim Acta，Ⅱ 1985；(5～6)：417
144 宋金如，曾 铮．岩矿测试，1989；8(2)：129
145 陈婉如，倰亚庆，潘教麦．华东师大学报，1988；(3)：57
146 乔玉兰，吴斌才．岩矿测试，1988；7(2)：100
147 杨丽华，杨仲平．冶金分析，1986；6(4)：3
148 胡有云，潘教麦．岩矿测试，1986；5(2)：144
149 黎心懿，杨丽华．分析试验室，1986；2(7)：29
150 Bykhovtsova T. T. et al. Zh. Anal. Khim.，1987；42(7)
151 林维明，张培兴．分析试验室，1986；5(11)：57
152 宋金如，宋成顺．岩矿测试，1989；8(4)：279
153 邓爱玲，孙浩波，李秉哲．洛阳工学院学报，1990；11(2)：78
154 王家凤，任建民，丁儒乾．岩矿测试，1989；8(4)：293
155 张迈生，李晓梅等．稀土，1990；11(4)：51
156 Zhang X，Wang M，Cheng J. Anal Chem，1988；60(17)：1670
157 郝廷璠，殷秀丽等．冶金分析，1989；9(6)：52
158 周晓波，潘教麦．理化检验（化），1989；25(6)：330
159 潘教麦，吴 岚．化学试剂，1990；31(2)：71
160 潘教麦，吴 岚，徐钟隽．化学试剂，1990；12(3)：129
161 殷探月．痕量分析，1989；5(4)：65
162 杨浩义．理化检验（化），1990；26(2)：75
163 关秀云，黄卫奇，潘教麦．分析试验室，1990；9(1)：32
164 罗守宽．四川有色金属，1989；(2)：35
165 宋映志．冶金分析，1991；11(1)：57
166 罗守宽．四川有色金属，1990；(3)：43
167 李 莉，潘 悦．冶金分析，1990；10(5)：7
168 何久康，彭殊丽．内蒙古大学学报（自），1990；2(2)：235
169 吴瑞林，洪 英．稀土，1990；11(4)：45
170 杨 屹，蔡汝秀，余席茂．分析试验室，1990；9(2)：61
171 严恒太，潘教麦．理化检验（化），1991；27(1)：24
172 刘恒椽，吴斌才，王淑娥．理化检验(化)，1990；26(1)：9
173 唐金华，康 平．理化检验（化），1990；26(2)：77
174 乔玉兰．分析化学，1990；18(1)：81
175 张秋萍，吴斌才．痕量分析，1990；(1～2)：63
176 宋现来，吴斌才．理化检验（化），1989；25(6)：350
177 李晓明，王巨敏，李 军．分析化学，1990；18(10)：958
178 杨 屹，蔡汝秀，余席茂等．化学试剂，1990；12(1)：15
179 赵 泓，戚荣民等．理化检验（化），1990；26(4)：205
180 曹如晟，徐宝玲．化学传感器，1990；10(3)：52
181 潘教麦，杨 茹，徐钟隽．分析化学，1990；18(12)：1083
182 许敬英．冶金分析，1990；10(5)：19
183 朱惠兰．冶金分析，1990；10(1)：56
184 陈婉如，陈嘉丽，潘教麦．分析测试通报，1991；10(3)：14
185 Hsu C，Wang X et al. Microchem J，1989；40(2)：175
186 陈婉如，潘教麦，徐钟隽．冶金分析，1989；9(4)：33
187 邱若兰，肖锦荣等．分析测试通报，1990；9(5)：78
188 汤慧民，刘慧中．上海环境科学，1990；9(11)：16
189 Gusev V I，Burylev B P et al. Zavod Lab，1989；55(2)：23
190 朱家新，肖其林．武汉冶金，1990；(2)：50
191 Kuban V，Gladilovich D B. Collect Czech Chem Commun.，1988；53(8)：1664
192 Kharzeeva S E，Dukhanan V S. Завод Лаб，1989；55(1)：27
193 李永涛，张维祥．理化检验（化），1990；26(1)：16
194 Botella J，Baena J M，Almohalla T. Rev Metal (Madrid)，1988；24(4)：271
195 安宝兰．稀有金属材料与工程，1990；(2)：60

196 周执明，顾丽忠，周庆芬. 中国稀土学报，1990；8(2)：171
197 Merisor Yu I，Nuzhdenova L G. Завод Лаб，1988；54(9)：12
198 Cha K W，Jung E S，Lee J H. Taehan Hwahakhoe Chi. 1989；33(3)：304
199 Abdel Ghani N T，Issa Y M，Satem A A. Microchem J 1988；4(2)：283
200 Stefan S L，El-Shetary B，Hanna W G et al. Orient J Chem，1988；4(2)：184
201 陈哲学. 矿冶工程，1990；10(3)：54
202 赵 泓，潘教麦，朱 戟. 理化检验（化），1990；26(6)：341
203 赵 泓，陶 炜，朱 戟等. 分析化学，1989；17(9)：811
204 Ueda K，Matsuda H，Yoshimura O. Anal Sci，1989；5(6)：725
205 Purohit D N，Chauhan R S. Rev Roum Chim，1988；33(4)：413
206 杨定国. 冶金分析，1990；10(3)：55
207 黎心懿，张华山，方北松. 化学试剂，1991；13(2)：89
208 黎心懿，张华山，何 旭. 理化检验（化），1992；28(1)：44
209 赵可清，吴斌才，刘恒様. 分析试验室，1992；11(2)：1
210 罗庆尧，余席茂，陈怀侠. 化学试剂，1991；13(1)：15
211 高锦章等. 分析化学，1992；20(3)：297
212 伊丽莹，张海政. 理化检验（化），1991；27(6)：326
213 高锦章等. 西北师范大学学报，1991；27(4)：27
214 余体芳. 分析试验室，1992；11(5)：48
215 魏永巨，张占辉等. 分析化学，1991；19(9)：997
216 魏永巨，张占辉. 河北师范学院学报，1993；(1)：83
217 乌 兰，云文安. 内蒙古大学学报（自），1992；23(2)：213
218 沈玲霞，万益群，杨泉生. 冶金分析，1992；12(1)：46
219 季德霖. 冶金分析，1991；11(6)：48
220 栗丞君. 有色金属与稀土应用，1992；(3)：23
221 万益群，聂基兰等. 分析测试通报，1993；12(2)：80
222 冉 勇，刘 铮. 分析化学，1993；21(3)：370
223 田忠厚. 光谱学与光谱分析，1992；(4)：9
224 杨浩义，焦焕良. 冶金分析，1992；12(3)：50
225 嵇志琴等. 分析化学，1991；19(11)：1295
226 谢治民，龙有前等. 湖南有色金属，1992；8(6)：379
227 李 红. 有色金属与稀土应用，1999；(3)：26
228 杨浩义. 冶金分析，1991；11(5)：40
229 杨金秀，张古英. 矿冶工程，1992；12(4)：67
230 朱其清. 土壤，1992；24(4)：219
231 何锦林，谭 红等. 冶金分析，1991；11(5)：52
232 金 伟，杨润兴. 分析试验室，1992；11(4)：40
233 何久康，高雨顺. 内蒙古大学学报，1992；23(2)：279
234 魏启慧，张丕禄. 原子能科学技术，1992；26(2)：41
235 张丕禄，魏启慧. 原子能科学技术，1992；26(6)：54
236 欧忠平等. 理化检验（化），1992；28(2)：75
237 郭茂兴. 冶金分析，1992；12(6)：49
238 欧忠平. 南京师大学报（自），1991；14(2)：50
239 乐美卿，王麟生等. 分析化学，1991；19(9)：1082
240 周执明，杨忠萍. 中国稀土学报，1991；9(1)：89
241 戴豪谦. 冶金分析，1991；11(6)：28
242 杨定国. 岩石矿物及测试，1991；10(3)：209
243 陈小萍，魏坤等. 痕量分析，1992；8(2)：50
244 臧二乐，梁树权. 痕量分析，1990；(3,4)：67

参 考 文 献

1 郑用熙，童爱军. 分析试验室，1993；12(3)：80
2 徐其亨等. 分析试验室，1993；14(4)：61
3 陈国珍等. 紫外-可见光分光光度法(下册). 北京：原子能出版社. 1983

第十七章　多元络合物吸光光度分析法

第一节　概述与研究进展

一、多元络合物的主要类型[1~3]

多元络合物就是由三种或三种以上不同组分参与而形成的络合物。多元络合物大体上可分为：①混合配位体化合物（简称混配化合物），亦称异配位体化合物；②离子缔合型络合物，亦称外配位层化合物；③表面活性剂增敏型络合物；④杂多核络合物，亦称为混合金属络合物。此外还有由上述诸型中数种混合而成的混合型多元络合物。

混配化合物根据混配的元数、配位体性质和类别和形成的混配化合物是由中性分子或是络阴离子和络阳离子来进一步进行分类，应用于光度分析的混配化合物以3元的较常用，如Co-二安替比林甲烷-硫氰酸盐、Cd-邻二氮菲-荧光桃红B、Ti-H_2O_2-5-Br-PADAP等体系。

离子缔合型络合物通常按金属络离子的荷电性质分为阳离子型和阴离子型两类，也可分为三类：①络阴离子$(ML_n)^{m-}$与大阳离子(Q_m^+)的缔合$Q_m(ML_n)$；②络阳离子$(MB_m)^{n+}$与大阴离子(A_n^-)的缔合$(MB_m)A_n$；③络阳离子和络阴离子的缔合$(MB_m)(ML_n)$。

表面活性剂增敏型络合物根据所用表面活性剂的类型可分为含有阳离子型表面活性剂的类型、含有阴离子型表面活性剂的类型、含有非离子型表面活性剂的类型和含有混合型表面活性剂的类型等。

杂多核络合物是指两种以上不同金属离子与一种或一种以上配位体共同形成的络合物，可以分为：杂多酸型络合物，同素异价型络合物，阴、阳络离子缔合型络合物［$(ML)_x(M'B_m)_y$］，桥型杂多核络合物（M-L-M′），氧桥型杂多核络合物［(M-O-M′)L］和金属离子间键型络合物（L-M-M′-L）等。

二、多元络合物吸光光度分析研究进展

多元络合物光度分析在近30多年来得到了迅猛的发展，尤其是在我国多元络合物光度分析的研究工作，无论是在深度还是在广度上都是其他国家所不及的，它构成了我国光度分析的特点之一。我国是在1973年开始研究胶束在光度法中的应用，1974年有评述总结[4]。多元络合物光度分析早期工作可参阅郑用熙的专著“胶束增溶分光光度法反应机理的探讨”（地质出版社，1980）。周始民[5]总结了1964至1981年的多元络合物光度分析的应用。有关多元络合物形成机理方面的研究工作也有很多报道，在胶束光度法有关机理方面主要有：显色剂结构；表面活性剂类型和结构；胶束增溶作用和胶束对溶质的吸光和发光增强作用的研究；混合表面活性剂中混合胶束的形成规律；非离子表面活性剂对碱性染料——杂多酸离子缔合物显色体系的增敏作用还是褪色作用的研究；盐效应的影响；溶剂化效应与混合胶束之间的相互关系；提高胶束增溶光度法选择性途径；溶液状态，有机溶剂化效应；极性端结构及次链长度及增敏的影响；从分子结构出发，讨论了离子缔合型络合物中增溶剂与分散剂的相互搭配及生成条件；从不同金属离子的电子云结构以及染料的分子结构出发，讨论了胶束增溶络

合物中表面活性剂的增敏规律；采用红外光谱探讨了阴离子表面活性剂的增敏机理和研究TritonX-100等非离子表面活性剂对离子缔合物显色反应的影响；把荧光探针、核磁共振、电子自旋共振等多种现代分析手段和光度法结合起来研究了含碳氟链的胶束微环境的性质；按胶束增溶的质量作用模型定量地讨论了染料与非离子表面活性剂的相互作用等。在混配化合物方面有对三元络合物组成等相关机理作了探讨；单核多核络合物的互变条件；共显色现象等。从以上研究可以看出，对多元络合物形成机理的研究，正不断地向纵深发展。

第二节　吸光光度法常用表面活性剂及有关性质

一、常用的各类型的表面活性剂

表 17-1　常用表面活性剂

名　　称	简　　称	结　构　式	性　　质
阳离子表面活性剂			
溴化羟十二烷基三甲基铵	DTMB	$[HO—(CH_2)_{12}—N(CH_3)_2—CH_3]Br$	
溴化双烷基甲基苄基铵	AMB	$[CH_3—N(R')(R'')—CH_2—C_6H_5]Br$	
氯化十二烷基辛基苄基甲基铵	DOBM	$[CH_3—(CH_2)_{11}—N(C_8H_{17})(CH_3)—CH_2—C_6H_5]Cl$	
氯化甲基三辛基铵	Aliguat 336 (N-263)	$[NR_3(CH_3)]Cl$　$R=C_8H_{17}$	Mr：475 黄绿色粘稠状液体
三烷基胺	N-235	$(C_nH_{2n+1})_3N$	黄色稠状液体
氯化十四烷基二甲基苄基铵	Zephiramine 或 Zeph	$[CH_3—(CH_2)_{13}—N(CH_3)_2—CH_2—C_6H_5]Cl$	Mr：367.5 白色结晶，含两分子结晶水。极易溶于水；不溶于苯、乙醚等有机溶剂
氯化十六烷基三甲基铵	CTMAC	$[CH_3—(CH_2)_{15}—N(CH_3)_2—CH_3]Cl$	
溴化十六烷基三甲基铵	CTMAB	$[CH_3—(CH_2)_{15}—N(CH_3)_2—CH_3]Br$	Mr：364.46 白色结晶粉末。易溶于醇
氯化十四烷基吡啶	TPC	$[CH_3—(CH_2)_{13}—NC_5H_5]Cl$	Mr：330.01 白色结晶，易溶于苯、吡啶、乙醇；溶于水；微溶于石油醚，pH=5.2～6.2
溴化十四烷基吡啶	TPB	$[CH_3—(CH_2)_{13}—NC_5H_5]Br$	Mr：374.46 白色结晶，易溶于苯、吡啶、乙醇；溶于水；微溶于石油醚，pH=5.2～6.2

续表

名称	简称	结构式	性质
N-氯化十六烷基吡啶	CPC	$[CH_3-(CH_2)_{15}-N(C_5H_5)]Cl$	Mr：358.01 白色粉末。易溶于热水、醇、三氯甲烷
溴化十六烷基吡啶	CPB	$[CH_3-(CH_2)_{15}-N(C_5H_5)]Br$	Mr：384.5 片状。溶于乙醇。微溶于苯、石油醚、冷丙酮、乙酸乙酯和冷水。但温度在约30℃时可溶性增加很快
溴化辛基三甲基铵	OTMAB	$[CH_3-(CH_2)_7-N(CH_3)_2-CH_3]Br$	
溴化正辛基吡啶	OPB	$[CH_3-(CH_2)_7-N(C_5H_5)]Br$	
阴离子表面活性剂 十二烷基苯磺酸钠	DBS	$C_{12}H_{25}-C_6H_4-SO_3Na$	
十二烷基硫酸钠	SDS	$CH_3(CH_2)_{10}CH_2OSO_3Na$	Mr：288.38 白色或微黄色粉状结晶，易溶于水
十二烷基磺酸钠		$CH_3(CH_2)_{10}CH_2SO_3Na$	Mr：272.06 白色或淡黄色粉末，易溶于水
两性表面活性剂			
十二烷基二甲基氨基乙酸	DDMAA	$C_{12}H_{25}-N(CH_3)_2-CH_2COOH$	
非离子型表面活性剂			
对(1,1,3,3-四甲基丁基)-苯基聚氧乙烯醚	TritonX-100	$(CH_3)_3C-CH_2-C(CH_3)_2-C_6H_4-O-(CH_2CH_2O)_9H$	无色稠状液体
聚乙二醇烷基苯基醚	乳化剂 OP	$R-C_6H_4-O-(CH_2CH_2O)_nH$ $R=C_9\sim C_{15}$　$n=10$	淡黄色稠状液体
十八醇聚氧乙烯(20)醚	Peregal O (平平加)	$C_{18}H_{37}O(CH_2CH_2O)_{20}H$	
失水山梨醇脂肪酸酯环氧乙烷加成物	Tween (吐温)	RCOO—[失水山梨醇]，连接 $O-(CH_2CH_2O)_xH$、$O-(CH_2CH_2O)_yH$、$O-(CH_2CH_2O)_zH$	
特殊表面活性剂			
羧甲基纤维素	CMC	$[C_6H_7O_2(OH)_2-CH_2O-CH_2-COONa]_n$（环状结构，含 $CH_2O-CH_2-COONa$）	白色或淡黄色粉末
聚乙烯醇	PVA	$-CH_2-CH(OH)-$	白色粉末

二、常用的各类型的表面活性剂的有关性质

表 17-2 某些表面活性剂的熔点（凝固点）和沸点[6]

表面活性剂	熔点或凝固点/℃	沸点/(℃·mm^{-1})	表面活性剂	熔点或凝固点/℃	沸点/(℃·mm^{-1})
阳离子			**非离子**		
$C_8H_{17}N(CH_3)_3Br$	198~200	—	$C_{10}E_5$	14.5	190/0.1
$C_{12}H_{25}N(CH_3)_3Br$	228~230	—		15.5	176/0.035
$C_{12}H_{25}N(CH_3)_3Cl$	252~255(分解)	—	$C_{10}E_6$	14	200/0.02
$C_{14}H_{29}N(CH_3)_3Br$	244~255	—		16.7	204/0.2
$C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Br$	237~243(227~235；237~239；230~234；237.5~239)①(dec)	—		18.2	195/0.03
			$C_{10}E_8$	26.3	
			$C_{12}E_6$	28；(24.7)	255/2 (216/0.015；222/0.1)
$C_{18}H_{37}N(CH_3)_3Br$	230~240	—	$C_{12}E_6$	35	206/0.02
$C_{16}H_{33}(NC_5H_5)Cl$	82~84(82.5℃)	—	$C_{16}E_6$	37(36.4；38.3)	
$C_{12}H_{25}NH_2 \cdot HCl$	178~179	—	$C_{16}E_7$	39	—
阴离子			$C_{16}E_8$	41.5	—
$C_{12}H_{25}OSO_3Na$	179(分解)	—	$C_{16}E_9$	43；(45.7)	·
$C_{13}H_{37}OSO_3Na$	189.5~191		$C_{16}E_{12}$	45.5	—
非离子			$C_{16}E_{15}$	47	—
$C_8E_3$②	−10.4	171/2	$C_{16}E_{21}$	49	—
C_8E_4	−2.0	150/0.005	$C_8C_6H_4E_4$	—	222/0.55
C_8E_5	1.0	176/0.001	$C_8C_6H_4E_5$	—	225/0.3
C_8E_6	−3.4	193/0.07(205/0.0001)	$C_8C_6H_4E_6$	—	250/0.3
$C_{10}E_4$	9.9	164/0.15	$C_8C_6H_4E_7$	—	150/0.01
	11.0	157/0.1			

①（ ）内的为不同文献的数据。

② C_8 代表碳氢链中有 8 个碳原子；E_3 代表有 3 个氧乙烯单元，余类推。

表 17-3 某些表面活性剂的紫外吸收[6] λ_{max}

表面活性剂	λ_{max}/nm	表面活性剂	λ_{max}/nm
阳离子		**阴离子**	
溴化十六烷基三甲基铵	240	十二烷基苯磺酸钠	225；261；265①
氯化烷基二甲基苄基铵($R=C_8 \sim C_{18}$)	252；257；263；269	**非离子**	
溴化十六烷基吡啶	259.5	聚氧乙烯烷基苯醚	277
氯化乙基吡啶	253；259；266	聚氧乙烯壬基苯醚($n=8 \sim 9$)	277
卤代烷基吡啶	255①		

① 所列波长约为一组吸收带的中心。

表 17-4 给出了某些表面活性剂的 HLB[5]。Griffin 提出采用亲水亲油平衡值 (Hydrophile-Lipophile Balance，简称 HLB) 来衡量分子的亲水与亲油力量的强弱。聚氧乙烯非离子表面活性剂的 HLB 值可由下式计算：

$$HLB\text{ 值}=\frac{\text{亲水基部分的 }Mr}{\text{表面活性剂的 }Mr}\times\frac{100}{5}$$

$$=\frac{\text{亲水基质量}}{\text{憎水基质量}+\text{亲水基质量}}\times\frac{100}{5}=(\text{亲水基质量}\%)\times\frac{100}{5}$$

多数多元醇的脂肪酸酯非离子表面活性剂可用下式计算 HLB 近似值

$$HLB=20\left(1-\frac{S}{A}\right)$$

式中 S 是酯的皂化值；A 为原料脂肪酸的酸值；Mr 为相对分子质量。

离子型表面活性剂的 HLB 须用实验测定，以浊度法最简便。

具有增溶作用的表面活性剂的 *HLB* 范围为 15～18。

表 17-4 各种表面活性剂的 *HLB* 值[1]

商品名称	活性剂的化学成分	类型[2]	*HLB*[3]
	油酸	A	1.0
Span 85	失水山梨醇三油酸酯	N	1.8
Arlacel 85	失水山梨醇三油酸酯	N	1.8
Atlas G-1706	聚氧乙烯山梨醇蜂蜡衍生物	N	2.0
Pluronic L_{81}	聚醚 L_{81}	N	2.0
Span 65	失水山梨醇三硬脂酸脂	N	2.1
Arlacel 65	失水山梨醇三硬脂酸酯	N	2.1
Atlas G-1050	聚氧乙烯山梨醇六硬脂酸酯	N	2.6
Emcol EO-50	乙二醇脂肪酸酯	N	2.7
Emcol ES-50	乙二醇脂肪酸酯	N	2.7
Atlas G-1704	聚氧乙烯山梨醇蜂蜡衍生物	N	3.0
Pluronic L_{61}	聚醚 L_{61}	N	3.0
Emcol PO-50	丙二醇脂肪酸酯	N	3.4
Atlas G-922	丙二醇单硬脂酸酯	N	3.4
（"纯"化合物）	丙二醇单硬脂酸酯	N	3.4
Atlas G-2158	丙二醇单硬脂酸酯	N	3.4
Pluronic L_{31}	聚醚 L_{31}	N	3.5
Emcol PO-50	丙二醇脂肪酸酯	N	3.6
Emcol EL-50	乙二醇脂肪酸酯	N	3.7
Arlacel C	失水山梨醇倍半油酸酯	N	3.7
Arlacel 83	失水山梨醇倍半油酸酯	N	3.7
Atlas G-2859	聚氧乙烯山梨醇 4,5 油酸酯	N	3.8
Atmul 67	甘油单硬脂酸酯	N	3.8
Tegin 515	甘油单硬脂酸酯	N	3.8
Aldo 33	甘油单硬脂酸酯	N	3.8
（"纯"化合物）	甘油单硬脂酸酯	N	3.8
Atlas G-1727	聚氧乙烯山梨醇蜂蜡衍生物	N	4.0
Emcol PM-50	丙二醇脂肪酸酯	N	4.1
Span 80	失水山梨醇单油酸酯	N	4.3
Arlacel 80	失水山梨醇单油酸酯	N	4.3
Atlas G-917	丙二醇单月桂酸酯	N	4.5
Atlas G-3851	丙二醇单月桂酸酯	N	4.5
Emcol PL-50	丙二醇脂肪酸酯	N	4.5
Span 60	失水山梨醇单硬脂酸酯	N	4.7
Arlacel 60	失水山梨醇硬脂酸酯	N	4.7
Atlas G-2139	二乙二醇单油酸酯	N	4.7
Emcol DO-50	二乙二醇脂肪酸酯	N	4.7
Atlas G-2146	二乙二醇单硬脂酸酯	N	4.7
Emcol DS-50	二乙二醇脂肪酸酯	N	4.7
Atlas G-1702	聚氧乙烯山梨醇蜂蜡衍生物	N	5.0
Emcol DP-50	二乙二醇脂肪酸酯	N	5.1
Aldo 28	甘油单硬脂酸酯	A	5.5
Tegin	甘油单硬脂酸酯	A	5.5
Emcol DM-50	二乙二醇脂肪酸酯	N	5.6
Atlas G-1725	聚氧乙烯山梨醇蜂蜡衍生物	N	6.0
Atlas G-2124	二乙二醇单月桂酸酯	N	6.1
Emcol DL-50	二乙二醇脂肪酸酯	N	6.1
Glaurin	二乙二醇单月桂酸酯	N	6.5
Pluronic L72	聚醚 L72	N	6.5
Span 40	失水山梨醇单棕榈酸酯	N	6.7
Arlacel 40	失水山梨醇单棕榈酸酯	N	6.7
Pluronic L62	聚醚 L62	N	7.0
Atlas G-2242	聚氧乙烯二油酸酯	N	7.5
Atlas G-2147	四乙二醇单硬脂酸酯	N	7.7
Atlas G-2140	四乙二醇单油酸酯	N	7.7
Atlas G-2800	聚氧丙烯甘露醇二油酸酯	N	8.0
Atlas G-1493	聚氧乙烯山梨醇羊毛脂油酸衍生物	N	8.0
Atlas G-1425	聚氧乙烯山梨醇羊毛脂衍生物	N	8.0
Atlas G-3608	聚氧丙烯硬脂酸酯	N	8.0
Pluronic L42	聚醚 L42	N	8.0
Span 20	失水山梨醇单月桂酸酯	N	8.6
Arlacel 20	失水山梨醇单月桂酸酯	N	8.6
Emulphor VN-430	聚氧乙烯脂肪酸酯	N	9.0
Atlas G-1734	聚氧乙烯山梨醇蜂蜡衍生物	N	9.0
Atlas G-2111	聚氧乙烯氧丙烯油酸酯	N	9.0
Atlas G-2125	四乙二醇单月桂酸酯	N	9.4
Brij 30	聚氧乙烯月桂醚	N	9.5
Tween 61	聚氧乙烯失水山梨醇单硬脂酸酯	N	9.6
Atlas G-2154	六乙二醇单硬脂酸酯	N	9.6
Tween 81	聚氧乙烯失水山梨醇单油酸酯	N	10.0
Atlas G-1218	混合脂肪酸和树脂酸的聚氧乙烯酯	N	10.2
Atlas G-3806	聚氧乙烯十六烷基醚	N	10.3
Tween 65	聚氧乙烯失水山梨醇三硬脂酸酯	N	10.5
Atlas G-3705	聚氧乙烯月桂醚	N	10.8
Tween 85	聚氧乙烯失水山梨醇三油酸酯	N	11.0
Atlas G-2116	聚氧乙烯氧丙烯油酸酯	N	11.0
Atlas G-1790	聚氧乙烯羊毛脂衍生物	N	11.0
Pluronic L63	聚醚 L63	N	11.0
Atlas G-2142	聚氧乙烯单油酸酯	N	11.1
Myrj 45	聚氧乙烯硬脂酸酯	N	11.1
Atlas G-2141	聚氧乙烯单油酸酯	N	11.4
PEG 400 单油酸酯	聚氧乙烯单油酸酯	N	11.4
Atlas G-2076	聚氧乙烯单棕榈酸酯	N	11.6
S-541	聚氧乙烯单硬脂酸酯	N	11.6
PEG 400 单硬脂酸酯	聚氧乙烯单硬脂酸酯	N	11.6
Atlas G-3300	烷基芳基磺酸盐	A	11.7
	三乙醇胺油酸盐	A	12.0
Igepal CA-630	烷基酚聚氧乙烯醚	N	12.8
Atlas G-1431	聚氧乙烯山梨醇羊毛脂衍生物	N	12.8
Atlas G-1690	聚氧乙烯烷基芳基醚	N	13.0
PEG 400 单月桂酸酯	聚氧乙烯单月桂酸酯	N	13.1
S-307	聚氧乙烯单月桂酸酯	N	13.1
Atlas G-2133	聚氧乙烯月桂醚	N	13.1

续表

商品名称	活性剂的化学成分	类型[2]	HLB[3]
Atlas G-1794	聚氧乙烯蓖麻油	N	13.3
Emulphor EL-719	聚氧乙烯植物油	N	13.3
Tween 21	聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸酯	N	13.3
Renex 20	混合脂肪酸和树脂酸的聚氧乙烯酯	N	13.5
Triton WR-1339	聚氧乙烯辛苯基醚甲醛加成物	N	13.9
Atlas G-1441	聚氧乙烯山梨醇羊毛脂衍生物	N	14.0
	聚氧乙烯辛基苯基醚	N	14.2
Atlas G-7596J	聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸酯	N	14.9
Tween 60	聚氧乙烯失水山梨醇单硬脂酸酯	N	14.9
Tween 80	聚氧乙烯失水山梨醇单油酸酯	N	15.0
Myrj 49	聚氧乙烯硬脂酸酯	N	15.0
Pluronic L64	聚醚 L64	N	15.0
Atlas G-2144	聚氧乙烯单油酸酯	N	15.1
Atlas G-3915	聚氧乙烯油基醚	N	15.3
Atlas G-3720	聚氧乙烯十八醇	N	15.3
Atlas G-3920	聚氧乙烯油醇	N	15.4
Emulphor ON-870	聚氧乙烯脂肪醇	N	15.4
Atlas G-2079	聚氧乙烯单棕榈酸酯	N	15.5
Tween 40	聚氧乙烯失水山梨醇单棕榈酸酯	N	15.6
Atlas G-3820	聚氧乙烯十六烷基醇	N	15.7
Atlas G-2162	聚氧乙烯丙烯硬脂酸酯	N	15.7
Atlas G-1471	聚氧乙烯山梨醇羊毛脂衍生物	N	16.0
Pluronic F68	聚氧乙烯丙烯醚	N	16.0
Myrj 51	聚氧乙烯单硬脂酸酯	N	16.0
Atlas G-7596P	聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸酯	N	16.3
Atlas G-2129	聚氧乙烯单月桂酸酯	N	16.3
西上马哥	聚氧乙烯十六醇醚	N	16.4
Atlas G-3930	聚氧乙烯油基醚	N	16.6
Tween 20	聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸酯	N	16.7
Brij 35	聚氧乙烯月桂醇醚	N	16.9
Myrj 52	聚氧乙烯 40 硬脂酸酯	N	16.9
Myrj 53	聚氧乙烯单硬脂酸酯	N	17.9
	油酸钠	A	18.0
Pluronic L35	聚醚 L35	N	18.5
Atlas G-2159	聚氧乙烯单硬脂酸酯	N	18.8
	油酸钾	A	20.0
Pluronic F88	聚醚 F88	N	24.0
Atlas G-263	N-十六烷-N-乙基吗啉基乙基硫酸盐	C	25～30
Pluronic F108	聚醚 F108	N	27.0
月桂醇硫酸钠	十二烷基硫酸钠（纯）	A	40.0

① 表中 HLB 值是由计算或实验测得的，其准确度在±1之内。
② N—非离子，A—阴离子，C—阳离子。
③ 其他天然乳化剂的 HLB 值：阿拉伯胶 8.0，明胶 9.8，西黄蓍胶 13.0，甲基纤维素 10.5。

表面活性剂形成胶束所必需的最低浓度，称为临界胶束浓度（Critical Micelle Concentration 简写成 C_{mc}），表 17-5[5]给出了某些表面活性剂水溶液的 C_{mc}，Mukerjee 曾总结出 71 种测定 C_{mc}的方法，常用的有表面张力法，测定液体表面张力的方法有滴重法和滴体积法和毛细上升高度法；染料法，测定方法通常有比色法或光度法以及染料滴定法两种；电导法等。

表 17-5　表面活性剂水溶液的 C_{mc}

活　性　剂	$C_{mc}/(mol\cdot L^{-1})$	$\theta/℃$
阳离子活性剂		
癸基溴化铵	5.0×10^{-2}	25
癸基三甲基溴化铵	6.5×10^{-2}	25
十二烷基氯化铵(DAC)	1.5×10^{-2}	25
十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)	1.5×10^{-2}	25
十二烷基氯化吡啶	1.5×10^{-2}	25
十二烷基溴化吡啶	1.1×10^{-4}	25
十二烷基碘化吡啶	5.6×10^{-3}	25
十二烷基苄基二甲基氯化铵	7.8×10^{-3}	25
十四烷基三甲基溴化铵	3.5×10^{-3}	25
十六烷基氯化吡啶	9.0×10^{-4}	25
十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)	9.2×10^{-4}	25
阴离子活性剂		
全氟化己酸	1.1×10^{-1}	18
全氟化辛酸	9.3×10^{-3}	35
癸酸钠	0.4×10^{-2}	25
癸基硫酸钠	3.3×10^{-2}	25
癸基磺酸钠	4.4×10^{-2}	30
十二烷酸钠	2.4×10^{-2}	25
十二烷基硫酸钙	3.4×10^{-3}	70
十二烷基硫酸铜(Ⅰ)	1.2×10^{-3}	30
十二烷基硫酸锂	8.8×10^{-3}	25
十二烷基硫酸银	7.3×10^{-3}	35
十二烷基硫酸钠(SDS)	8.1×10^{-3}	25
十二烷基磺酸镁	3.6×10^{-3}	60
十二烷基磺酸钠	9.8×10^{-3}	25
n-十二烷基苯磺酸钠	1.6×10^{-3}	25
2-磺酸钠十四烷酸	5.2×10^{-3}	25
十四烷基硫酸钠	2.1×10^{-3}	25
十六烷基硫酸钠	5.2×10^{-4}	40
两性活性剂		
十二烷基二甲基丙酸铵盐	5.3×10^{-3}	30
3-(二甲基十二烷基铵)丙基-1-磺酸钠(DDAPS)	1.2×10^{-3}	25
3-(十二烷基甲基铵)丙基-1-磺酸钠	4.3×10^{-3}	25
N-十二烷基-N,N-二甲基乙氨酸	1.8×10^{-3}	23
C-十二烷基-N,N-二甲基乙氨酸	1.3×10^{-3}	27
非离子活性剂		
己基聚氧乙烯(3mol)醚	1.1×10^{-1}	25

续表

活性剂	C_{mc}/(mol·L⁻¹)	θ/℃	活性剂	C_{mc}/(mol·L⁻¹)	θ/℃
非离子活性剂			壬基聚氧乙烯(15mol)醚(Igepal CO-730)	2.8×10^{-4}	25
辛基聚氧乙烯(3mol)醚	7.5×10^{-3}	25	壬酚聚氧乙烯(20mol)醚(Igepal CO-850)	$(1.35\sim1.75)\times10^{-4}$	25
癸基聚氧乙烯(3mol)醚	6.0×10^{-4}	25	失水山梨醇单油酸酯聚氧乙烯(20mol)醚(Tween80,聚山梨酸酯80)	1.3×10^{-2} (g·dL⁻¹)	25
辛基聚氧乙烯(6mol)醚	9.9×10^{-3}	25	十六烷基聚氧乙烯(20～40mol)醚(Cetomacrogol)	7.7×10^{-5}	25
癸基聚氧乙烯(6mol)醚	9.0×10^{-4}	25	十二烷基聚氧乙烯(23mol)醚(Brij 35,Lauromacrogol)	$(6.0\sim9.1)\times10^{-5}$	25
十二烷基聚氧乙烯(6mol)醚	8.7×10^{-5}	25	二壬基酚聚氧乙烯(24mol)醚(Igepal DM-730)	4.7×10^{-4}	25
辛基聚氧乙烯(9mol)醚	1.3×10^{-2}	25	*N*,*N*-二甲基十二烷基氧化胺	2.1×10^{-3}	27
癸基聚氧乙烯(9mol)醚	1.3×10^{-3}	25	十二烷基二甲基氧化膦	5.7×10^{-4}	30
十六烷基聚氧乙烯(9mol)醚($C_{16}E_9$)	2.1×10^{-6}	25	单癸酰蔗糖	1.9×10^{-4}	20
苯酚聚氧乙烯(9mol)醚	0.54%(φ)	--			
p-1,1,3,3-四甲基丁基酚聚氧乙烯(9.5mol)醚(Triton X-100)	-	-			
十六烷基聚氧乙烯(12mol)醚	2.3×10^{-6}	25			

表 17-6 某些非离子表面活性剂的浊点

表面活性剂	浊点/℃	表面活性剂	浊点/℃	表面活性剂	浊点/℃
$C_6E_3$①	37(3%)	$C_{12}E_5$	25(0.1%)	$C_9C_6H_4E_{10}$	62～65
C_6E_4	67.5(3%)	$C_{12}E_6$	55;48(0.1%)～49(0.1%)	$C_9C_6H_4E_{15}$	92～95
C_6E_5	75(3%)	$C_8C_6H_4E_7$	27	$C_9C_6H_4E_{15.4}$	98
C_6E_6	80.5(3%)	$C_8C_6H_4E_8$	52	$C_9C_6H_4E_{20}$	98
C_8E_4	35.5	$C_8C_6H_4E_9$	67	$C_9C_6H_4E_{30.2}$	98
C_8E_5	55	$C_8C_6H_4E_{10}$	78	Tween 20	95
$C_{10}E_4$	18(0.1%)	$C_9C_6H_4E_5$	0	Tween 60	76
$C_{10}E_5$	36(0.1%)	$C_9C_6H_4E_{8\sim9}$	31～33	Tween 80	93
$C_{10}E_6$	57;60(0.1%)	$C_9C_6H_4E_{9.5}$	57.8		
$C_{20}E_{10}$	88	$C_9C_6H_4E_{9\sim10}$	51～54		

① E_3 代表 3 个氧乙烯单元，余类推。

表面活性剂水溶液的浊点测定是检验聚氧乙烯型非离子表面活性剂纯度的灵敏而简单的方法，表 17-6[6]列出了部分非离子表面活性剂的浊点。

第三节 多元络合物吸光光度分析法的应用

本节收集了从 80 年代初至今的在我国多元络合物吸光光度法的主要应用文献。在汇总文献时参照了从 1987 年至 1995 年在分析试验室上发表的有关光度分析综论中的相应的表格，见十五章参考文献[3～8]。

混配络合物的应用见表 17-7。胶束光度法各体系按增强剂种类不同，分别列于表 17-8～表 17-13。离子缔合型络合物见表 17-14。

表 17-7 混配络合物体系吸光光度分析法应用示例

元素(A)	体系(B—C)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10⁴	线性范围	组成比(A:B:C)	文献
BrO_3^-	$(5\text{-Br-PADAP})^{2+}\text{-}SCN^-$	(0.16～0.64)mol·L⁻¹ H_2SO_4	540	4.3	(0～64)μg/25ml	1:1:1	1
Co	二安替比林甲烷-硫氰酸盐	0.4mol·L⁻¹HCl	620		—	1:2:4	2
Co(Ⅱ)	亚硝基 R 盐-结晶紫(聚乙烯醇存在下)	pH=2.1～2.7	510	14.7	(0～3.0)μg/25ml	1:3:6	3
Cd	邻二氮菲-荧光桃红 B	pH9 磷酸介质	560	9.4	—	—	4
Cu	2,9-二甲基邻二氮菲-荧光桃红	pH=8～9.5 氯化铵	550	7.4	—	1:2:1	5
	EGTA-H_2O_2	pH=2.75～3.0	720	--	—	1:1:1	6
	邻二氮菲-铬天青 S	pH=5～9	615	0.75	—	2:2:1	7
	间氯偶氮安替比林-NH_3	氨性介质	612	4.27	—		8
Fe(Ⅱ)	甲基橙-邻二氮菲	pH=1.5～2.5	500	17.4	(0～50)μg/25ml	1:2:3	9

续表

元素(A)	体系(B—C)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	线性范围	组成比(A:B:C)	文献
Fe(Ⅱ)	链霉素水解产物-邻二氮菲	pH5.0	500	4.35	(0.12~28)$\mu g \cdot ml^{-1}$	1:1:2	10
Hg	邻二氮菲-荧光桃红B	pH=7.5~9	564	8.2	—	1:2:1	11
IO_3^-	$(5\text{-Br-PADAP})^{2+}$-SCN^-	(0.4~0.6)$mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4	540	10.5	(0~10.0)μg/10ml	1:1:1	12
La系	偶氮氯膦-mA-二安替比林甲烷	pH=3.0~3.6水，乙醇介质	650	9.4~13		1:2:1	13
Mo	羟胺-5-Br-PADAP	—	605	4.5		—	14
MO(Ⅵ)	邻苯二酚紫-结晶紫	pH=3.5~5.0	645	5.16	(0~10)μg/25ml	1:2:2	15
Ti	抗坏血酸(或羟胺)-苯羟乙酸-噻唑	pH=5.8~6.2	540	8.8	—	1:3:2:2	16
	抗坏血酸-苯羟乙酸-铍试剂Ⅲ	pH=5.0~6.5	570~580	6.0	—	1:4:1:2	17
	邻二氮菲-苯羟乙酸-铍试剂Ⅲ	pH=3.8~7.0，乙酸和乙酸钠	580	4.0	—	—	18
	过氧化氢-氯代磺酚S	pH=1.5~5.0	630	2.22	—	—	19
	过氧化氢-5-Br-PADAP	pH1.5	605	--	—	2:3:1	20
	过氧化氢-5-Cl-DADAT	0.14$mol \cdot L^{-1}$磷酸	570	—	—	1:1:1	21
	羟胺-DiBr-PADAP	pH=3.5~4.5	610	6.0	—	1:1:1	22
	过氧化氢-DiBr-DMPAP	1.5$mol \cdot L^{-1}$磷酸	600	5.6	--	1:1:1	23
	过氧化氢-DiBr-PADAP	(0.25~0.3)$mol \cdot L^{-1}$硫酸	605	5.68		—	24
	间氯偶氮安替比林-H_2O_2	pH3.4	615	1.9	(1~30)μg/25ml	1:1:2	25
Te(Ⅳ)	乙基紫-SCN^-(聚乙烯醇存在下)	(0.36~0.84)$mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4	560	155	(0~5)μg/25ml	—	26
稀土	三氯偶氮氯膦-结晶紫	pH=2.0~2.5	605	5.18	(0~10)μg/25ml	1:2:2	27
V	过氧化氢-PAR	(0.035~0.15)$mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4	550	1.4	—	—	28
	过氧化氢-噻唑偶氮二乙基氨基酚	pH=0.5~2.0	590	3.68	—	1:1:1	29
	吡啶偶氮间苯二酚(PAR)-H_2O_2(100℃热2min)	0.5 $mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4	550	1.32	—	—	30
	PAR-NH_2OH	pH=2~4	550	35	(2~100)μg/50ml	1:1:1	31
W	过氧化氢-氯代磺酚C	0.5$mol \cdot L^{-1}$盐酸	650~660	3.6	—	1:1:1	32
Y	邻二氮菲-铬天青S	pH=7.2~8.4，存在羟基，磺酸钠	645	19.8		1:2:2	33
Zr	EDTA-噻唑	pH=5.6~6.6	503	2.81	—	1:1:1	34
	3.5-二溴-PADAP-安替比咪	pH=1~2	615	13.5	(0~25)μg/25ml	1:1:1	35

本表参考文献：

1 冠宗燕，刘锡林等．分析化学，1990；18(7)：668
2 曾麟如，杨丽华．华中师院学报(自然科学报)，1984；(1)：73
3 沈含熙，凌　善．分析化学，18(8)：700
4 张有贤，武丽文．分析试验室，1985；4(8)：63
5 李晓明等．辽宁大学学报(自然科学报)，1985；(1)：90
6 胡　翔．化学试剂，1983；(3)：150
7 张树成等．分析化学，1985；13(11)：828
8 张文德．分析化学，1991；19(1)：127
9 王颖慧，李献功等．天津化工，1991；(4)：47
10 杜　鸣，徐建华．分析化学，1991；19(9)：1078
11 郭安成等．分析化学，1984；12(8)：728
12 赵心伟，冠宗燕等．化学试剂，1991；13(2)：117
13 白光弼．西北师范学院学报，1985；(3)：11
14 何淑琼，林彩霞等．冶金分析，1984；4(2)：63
15 杨忠斌，李绵林．分析化学，1991；19(4)：478
16 刘绮洪．冶金分析，1985；5(1)：19
17 刘绮洪．分析化学，1983；11(10)：733
18 刘绮洪．分析试验室，1983；2(5)：16
19 陈哲海等．冶金分析，1986；6(2)：32
20 秦光荣．化学试剂，1982；4(1)：24
21 匡　军等．冶金分析，1984；4(6)：16
22 张　帆，陈国南．环境化学，1982；1(3)：221
23 孙慧珠等．分析化学，1982；10(1)：6
24 周始民．分析试验室，1983；2(2)：50
25 郝恒坤，雷亚林．分析化学，1991；19(3)：535
26 李祖碧，徐其亨．分析化学，1990；18(7)：638
27 杨志斌，李杰峰等．分析化学，1990；18 (9)：856
28 张友文，田风英．分析试验室，1983；2(5)：60
29 冯建章，韩立彪．分析试验室，1985；4(10)：16
30 黄祖贤．广西化工，1990；(4)：37
31 王颖慧，李献功等．精细石油化工，1991；(6)：49
32 孙若诚，马玉珊．辽宁冶金，1983；(3)：42
33 白继昌，胡可人．分析试验室，1985；4(7)：14
34 王东进等．高等学校化学学报，1983；4(4)：453
35 刘锦昌，周奇展．冶金分析，1992；12(3)：1

表 17-8 含有阳离子型表面活性剂的体系的吸光光度分析法应用示例

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Al	铝试剂-CTMA B	pH=3.3~5.0	545	3.1	(0~18)μg/25ml	—	1
	ECR-CTMA B(或其他)	pH=5.5~6.7	605	11.5	—	—	2
	CAS-溴化癸基三甲铵	pH=5.7~7.4	605	18	(0~0.7)μg/25ml	—	3
	CAS-CTMAB-乙醇		615	23.6	(0~5.4)μg/25ml	1:3:4:2	4
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=5.5~6.5	580 52	16	(0~5)μg/25ml	1:2:4	5
	二甲酚橙-F-CPB	pH=6.5~7.5	520	1.6	(0~11)μg/25ml	1:1:2:1	6
	芦丁-CTMAB	pH=5.6~6.0	425	2.80	$(0\sim1.6\times10^{-3})$ mol·L^{-1}	1:2	7
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH6.5	568	15.6	(0~4.2)μg/25ml	1:2	8
	间硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH6.5	583	11.0	(0~4.0)μg/25ml	1:2	8
	对硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH6.5	583	8.00	(0~3.7)μg/25ml	1:2	8
	DOABS-CTMAB	pH5.2	510	6.6	(0~9.0)μg/25ml	1:2	9
	邻氯基苯基荧光酮-CTMAB	pH=5.5~7.0	570	10.8	(0~11)μg/25ml	1:2	10
	铬天青 S-CPB	pH=5.7~6.0	620	12	(2.5~25)μg/50ml Al_2O_3	1:2:2	11,12
	水杨基荧光酮-CPB	pH=6~7	563	12	(0.03~5.0)μg/25ml Al_2O_3	—	13
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH=5~8	568	10.5	—	—	14
	邻溴二甲基二羧基品红酮-CTMAB	pH5.2	640	12.6	(0~5)μg/25ml	—	15
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH6.0	566	13.5	(0~8)μg/50ml	—	16
	邻苯三酚红-EGTA-CPB	pH=5.0~5.9	615	5.9	(0~8)μg/25ml	1:1:3:12	17
	3,4-二羟基偶氮苯-4'-磺酸钠-CTMAB	pH=9~10	520	8.4	(0~6.5)μg/25ml	1:4	18
	依来铬氰蓝 R-CTMAB	—	590	12	(0~25)μg/25ml	—	19
	5-溴水杨基荧光酮-溴化十六烷基吡啶	pH=5.5~6.8	568	17	(0~6)μg/25ml	—	20
	3,5二溴水杨基荧光酮-CTMAB	pH6	564	14	(0~5)μg/50ml	1:2	21
	F-*o*-NPF-CPC	pH6.7	570	9.31	(0~7)μg/25ml	—	22
	邻硝基苯基荧光酮-CPB	pH5.0	559	7.82	(0~10)μg/25ml	1:1	23
	CAS-CPB	pH5.8	610		—	—	24
	CAS-CTMAB	pH=5.55~6.15	625	11.6	(0~4)μg/25ml	1:3:4	25
Ag	曙红-1,10-菲罗啉-CTMAB	pH4	545	8.4	(0~20)μg/25mlAg		26
	4,4'-四乙基二胺基二苯甲硫酮-Zeph	pH=4.5~5.6	515	8.0	(0~12.5)μg/25ml	1:4	27
	5,10,15,20-四(4-甲基-3-磺苯基)卟啉-CTMAB	pH11.5	427.8	37.0	(0~6)μg/25ml	1:1	28
	四(4-吡啶)卟啉-CTMAB	—	425.5		(0~9)μg/25ml	—	29
	5,10,15,20-四(3-氯-4-磺酸苯基)卟啉-CTMAB	pH11.5	427.2	32.3	(0~6)μg/25ml	1:1	30
	meso-四(4-磺酸基)卟啉-CTMAB	pH>10.5	424	52.1	(0~8)μg/25ml	—	31
Au	硫代米蚩酮-CTMAB	pH=2.2~2.8	545	13.2	(0~20)μg/25ml	—	32
	硫代米蚩酮-CPB	pH=2.5~5.0	550	16.0	(0~20)μg/25ml	—	33
	硫代米蚩酮-SDS	pH=2.0~4.0	555	16.0	(0~15)μg/25ml	—	34
	硫代米蚩酮-Zeph	pH=4.5~5.6	565	17.3	—	—	35,36
	硫代米蚩酮-CTMAB	pH=2.5~4.5	550			—	37
	5-(4-苯磺酸基偶氮)-8-氨基喹啉-CTMAB	碱性介质	605	14.8	(0~22)μg/10ml		38

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Au	5-(4-胂酸基苯偶氮)-8-氨基喹啉-CTMAB	—	594	9.23			38
	5-对胂酸基苯偶氮-8-氨基喹啉-CTMAB	pH=9.4~14	598	8.65	(0~40)μg/25ml	1:3	39
	硫代米蚩酮-CTMAB	pH3.0	545	19.8	(0~20)μg/25ml		40
	硫代米蚩酮-CTMAB	—		15			41
	N,*N*,*N'*,*N'*-四甲基二氨基二苯甲烷-氯化十二烷基乙酸铵	pH=2.5~3.2	615	15.2	(0~30)μg/25ml		42
As	砷锑钼杂多酸-孔雀绿-CTMAB	(1.2~1.4)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	630	20.0	(0~2.0)μg/10ml	—	43
Be	CAS-CPB	pH=9~10	520	4.4	(0~10)μg/50ml	1:3:3	44
	ECR-CPB	pH=5.3~5.8	590	8.4	(0~4)μg/25ml		45
	溴邻苯三酚红-CPC	pH7.8	640	3.60	(0~20)μg/50ml	1:2:4	46
	依来铬青蓝 R-CTMAB	pH=9~10	560	4.00	(0.1~2.0)μg/50ml		47
	铬天青 B-CPC	pH=4.5~6.5	615		(0~3.5)μg/25ml	1:2:2	48
	铬天青 S-CPC	pH5	605	17.3	(0~0.7μg/25ml Be		49
	半二甲酚橙-CPB	pH6.4	500	0.906	(0~12.5)μg/25ml Be	1:2:2	50
	姜黄素-CPB(或 TX-100,CPB-TX-100,SDBS)同时测 Fe,Ti,Zr	—		12.5	—	—	51
	姜黄素-CPB	pH11.8	550	12.5	(0~8)μg/25ml	1:2	52
	醌茜素-CTMAB	2×10^{-2}mol·L^{-1} NaOH	626	1.32	(1~5)μg·ml^{-1}	1:2	53
	甲基百里酚蓝-CTMAB	pH=6~7,乙酸-乙酸钠	518	1.04	(0~30)μg/50ml	1:1:2	54
	二甲酚橙-CTMAB	pH6.5,乙酸-乙酸钠	496~502	1.51	(1~35)μg/50ml	1:1:2	55
	二甲氧基苯基荧光酮-CTMAB	pH8.4	542	9.85	(0~0.38)μg·ml^{-1}	1:1	56
Bi	邻苯三酚红-CTMAB	—	615	2.0	—	1:1:2	57
	溴邻苯三酚红-phen-CTMAC	pH4.0	620	7.10	(0~50)μg/50ml	1:1:1	58
	苯基荧光酮-CTMAB	pH=6~11	560	15.6	(0~28)μg/25ml	1:2:5	59
	茜素紫-CPC	pH=4.0~5.8	620	2.0	(0~300)μg/50ml		60
	茜素紫-*N*,*N*-二氨丙基十六胺盐酸盐	pH=4~6.5	600	4.84	(0~80)μg/25ml Bi	—	61
	间氯苯基荧光酮-硫脲 CTMAB	pH6.2	560	18.3	(0~5)μg·ml^{-1}	—	62
	5-溴水杨基荧光酮-CTMAB	pH=5.5~6.8	560	32.9	(0~5)μg/25ml	—	63
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=4.0~6.0	585	33.4	(0~5)μg/10ml	1:3:6	64
Ca	CAS-phen-CTMAB	0.12mol·L^{-1} NaOH	620	4.2	(0~15)μg/25ml	1:2	65
	二甲酚橙-CTMAB	pH=10.2~10.8	605	4.5	(0~12)μg/25ml	1:2	66
	甲基百里酚蓝-CTMAB	强碱性	630	3.1	—	—	67
	PAR-CPB	pH=12~13	495	63.8	400μg/50ml	1:4:1	68
Cd	CAS 2,2'-联吡啶-CPB	pH=10~11.6	602	11	(0~20)μg/25ml	1:1:1:4	69
	CAS-Phen-CTMAB	pH=10.2~11.4	595	8.4	(0~25)μg/25ml	1:1:1:3	70
	5-Br-PADN-CTMAB	pH=9.0~10.0	553	5.4	(0~40)μg/10ml	1:2	71
	四-4-(三甲铵苯基)卟啉-CPB-乙醇	pH11.0	436	95	0~0.28×10^{-6}	—	72
	邻氯苯基荧光酮-CPC	pH10.6	600	15.4	(0~12)μg/25ml Cd	1:3:3	73
	铁试剂-TPB	pH=4.5~5.5	390	3.2	(0~30)μg/10ml Cd	—	74
	meso-四(4-甲基-3-磺基苯)卟啉-CTMAB	pH=9.7~11.7	440	76	(0~0.7)μg/10ml	—	75
	meso-四(4-磺酸基苯)卟啉 抗坏血酸	pH10.3	439	46.2	(0~8)μg/25ml	2:4:1	76
CN^-	Hg(Ⅰ)-四(对磺基苯)卟啉-CTMAB	pH10.5	443	—	(0~4.0)μg/25ml CN^-	—	77

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Co	CAS-α-氨基吡啶-溴化十八烷基三甲铵	pH=10.1～11.2	612	9.5	(0～12)μg/25ml	1:2:1:4	78
	1,4-双肼酞嗪-CTMAB	pH=7～8	510	2.20	(5～45)μg/25ml	1:1	79
	漂蓝 6B-4,4-联吡啶-CTMAB	pH=10.2～11.6	632	7.81	(0～15)μg/25ml	1:2:4:6	80
	DMTAB-SDS	酸化至 3mol·L⁻¹ HCl	592	6.14	(0～20)μg/25ml		81
	2,4-二甲氧基苯基荧光酮-CTMAB	pH=8.8～9.5	600	9.73	(1～10)μg/25ml Co	1:2	82
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=11.5～12.0	613	15.7	(0～6.5)μg/25ml Co	—	83
	漂蓝 6B-4,4′-二苯基-CTMAB	pH≈10.5	634		(0～11)μg/25ml Co	—	83
	四(4-三甲铵苯基)卟啉-CPB	pH9.8	432	53.1	(0～3)μg/25ml	—	84
	5-(4-磺基苯偶氮)-8-(对甲苯磺酰氨基)喹啉-CTMAB,同时测 Cd、Pb	pH10.2	585	12.9	(0～8)μg/25ml	2:1	85
	四(4-三甲氨基苯)卟啉-CPB	pH9.6	426	20.5	(0～5)μg/25ml	—	86
	TAAQ-CTMAB	(0.04～0.02)mol·L⁻¹ NaOH	630	12.3	(0～10)μg/25ml	1:3	87
	BPTAQ-CTMAB	pH9.5	650	15.3	(0～10)μg/25ml	1:4	88
	5-(4-羧基苯偶氮-8-对甲苯磺酰氨基)喹啉-CTMAB	0.5% NaOH	590	11.3	(0～11)μg/25ml	1:3	89
	5-(4-磺酸钠苯偶氮)-8-氨基喹啉-CTMAB	pH10.5	587.2	8.8	(0～16)μg/25ml	1:2	90
Cr	CAS-CTMAB		618	11.7	(0.04～0.4)μg/ml	1:3	91
	CAS-CTMAB	pH=9～5.3	610	12.9	(0～14)μg/50ml	2:3:2	92
	CAS-CPB	pH3.7	640	10.4	(0～5)μg/25ml	—	93
	二溴苯基荧光酮-CPB	pH=3.5～5.0	586	14	(0～2.5)μg/10ml	1:3	94
	哌唑-CTMAB	pH=4.8～5.4	555	9.0	(0～10)μg/50ml	1:3	95
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=6.0～6.6	571	16.6	(0～5)μg/25ml	1:2	96,97
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=5.6～6.8	565	12	(0～6)μg/50ml	—	98
	5-Br-PADAP-Zeph	pH=3.5～5.5	595	13.5	(0～25)μg/25ml	1:2:2	99
	苯基荧光酮-CTMAB	pH=5.5～7.2	575	12.5	(0～10)μg/25ml	1:2	100
	CAS-CPB	pH=3.2～4.0	620	12.8	(0～0.4)μg·ml⁻¹	1:3:4	101
	邻氯基苯基荧光酮-CTMAB	pH9.5	582	12.5	(0～14)μg/50ml		102
	漂蓝 6B-CTMAB	pH=3.7～4.5	630	13.5	(0～8)μg/25ml	1:2	103
Cr(Ⅵ)	二溴茜素紫-CTMAB	pH5	620	4.54	(0～10)μg/25ml Cr	—	104
Cr(Ⅲ)	铬青 R-CTMAB-乙醇	pH4.0	600	10.7	(0～10)μg/25ml Cr_2O_3	—	105
	苯基荧光酮-溴化十六烷基吡啶	pH=5.0～7.0	580	11.0	(0～6)μg/25ml	1:2:2	106
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH5	582	11.5	(0～5)μg/25ml	1:2:2	107
	CAS-CPB	pH=4.8～5.4	620	10.8	(0～1.6)μg/25ml	1:2:2	108
	PAR-TEA-CTAB	pH=6.5～7.5	540	5.8	(0～200)μg·L⁻¹	—	109
	邻苯二酚紫-CTMAB	pH5.5	650	6.2	(0～14)μg/25ml	—	110
	二安替比林基-4-羟基苯基甲烷-CTMAB		435	100	(0.1～0.7)μg/25ml	—	111
Cu	邻硝基苯基荧光酮-CPC	pH=5.5～5.6	600	10.8	(2～8)μg/25ml	—	112
	3,5-DiBr-DMPAP-TPC	pH=7.5～8.5	613	13	(0～6)μg/25ml	1:3:3	113
	二甲酚橙-CPC	pH=8.8～9.5	605	4.04	(0～10)μg/25ml	1:4:3	114
	PAN-CPB	pH=1.0～2.0	560	2.0	(0～100)μg/25ml	1:1	115
	吡啶-CAS-CTMAB	pH=8.1～8.7	600	9.57	(0～10)μg/25ml	—	116
	CAS-CTMAB	pH=7.8～8.7	612	11.1	(0～10)μg/25ml	1:2:4	117
	5-Br-PADAP	pH=4.5～7.0	565	8.5	(0～20)μg/25ml	1:2	118
	漂蓝 6B-CTMAB	pH=6.4～7.4	624	11.0	(1.5～14.5)μg/25ml	1:2:3	119
	5-Br-PADAP-CTMAB	pH=1.5～4.0	565	8.5	(0～20)μg/25ml	1:2	120

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Cu	4,5-二溴苯基荧光酮-CPB	pH=10~11	640	12.7	(0~20)μg/25ml	1:3	121
	α、β、γ、δ-四(4-甲基苯基卟啉-SDBS)	pH4.7	414	45.0	(0~10)μg/25ml	1:1	122
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH6.5	580	11.9	(0~4)μg/25ml Cu	1:2	123
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH5	590	15	(0~7)μg/25ml Cu	—	124
	5-(6-溴-2-苯并噻唑偶氮)-8-羧基喹啉-CTMAB	pH4.8	570	13.0	(0~20)μg/25ml	· ·	125
	苯基荧光酮-CPB	pH5.4	565	11.0	(0~3)μg/25ml	—	126
	苯基荧光酮-CTMAB	pH=5.30~5.60	560	11.0	(0~3)μg/25ml	1:1:2	127
	二乙基二硫代氨基甲酸盐-CPB	pH=10~11	440	18.0	(0.007~0.4)μg/50ml	2:3:3	128
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH6.0	600	13.7	(0~20)μg/50ml	1:1:2	129
	2-(4,5-二甲基-2-噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯甲酸-CTMAB	pH=4.5~6.0	650	5.5	(0~24)μg/25ml	1:1	130
	水杨基荧光酮-CTMAB,同时测 Cr	pH5.7	562	7.89	(0~20)μg/25ml	2:1	131
	5-(对甲基苯基偶氮)-8-氨基喹啉-CTMAB	pH=9.0~10.0	547	3.62	(0~13)μg/10ml	1:1	132
	5-(对苯磺酸钠)偶氮-8-(对甲苯磺酸氨基)喹啉-CTMAB	碱性	585	3.5	(0~20)μg/25ml	1:2	133
	5-(4-胂酸基苯偶氮)-8-氨基喹啉-CTMAB	pH=8~14	580	8.9	(0~15)μg/25ml	1:3	134
	二苯碳酰二肼-CPB	pH10.2	510	165	(0.05~1.0)μg/25ml	1:2:3	135
	1-(8-羟基喹啉-7-偶氮)对硝基苯-CTMAB	pH6.1	430	5.4	(0~10μg/25ml	—	136
	DBC-偶氮氯膦-CTMAB	pH=3.5~6.4	610	18.5	(0~0.6)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	137
	o-NPF-CTMAB	pH6.3	595	12.5	(0~7)μg/25ml	—	138
	5-(4-磺酸钠苯偶氮)-8-氨基喹啉-CTMAB	pH9.5	584.6	7.8	(0~20)μg/25ml	1:2	139
	KSCN-氯化三辛基甲基铵-二甲苯	HCl	—	—	(0.02~1)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	140
	甲基橙-CTMAB	pH3.8	580	295	(0.1~0.6)μg/25ml	—	141
F	对水杨基荧光酮-Zr-CTMAB 的退色作用	- -	512	0.85	(5~50)μg/50ml	-	142
Fe	水杨基荧光酮-CPB	pH=11~12	590~600	12	(0.10~2.5)μg/25ml	—	143
	CAS-CTMAB	pH3.8	630	11	(0~5)μg/25ml Fe_2O_3	1:3:1	144
	甲基百里酚蓝-CTMAB	pH=4.0~6.5	540	2.75	(0~60)μg/50ml	1:2:2	145
	DOABS-CTMAB	pH5.0	535	6.50	(0~14)μg/25ml	1:2	146
	3,5-DiCl-PADAT-SDBS	pH=4.5~6.0	565	8.14	(0.04~0.80)$\times 10^{-6}$	1:2:2	147
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH8.5	591	13	(0~12)μg/50ml Fe(Ⅲ)	1:3	148
	溴代二甲氨基苯基荧光酮-乙酰丙酮-CTMAB	pH10.0	608	16.1	(0~5.5)μg/25ml Fe	1:2	149
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH7.2	578	13.3	(0~15)μg/25ml Fe	1:2	150
	邻苯三酚红-CTMAB	pH4.4	640	3.3	(0~8)μg/25ml Fe(Ⅲ)	1:2:3	151
	5-Br-PADAP-TPB	pH5.7	560		(0~8.0)μg/25ml Fe(Ⅱ)	—	152
	甲基百里酚蓝-CPB	pH=4.0~6.0	520	26	(0~60)μg/25ml Fe(Ⅱ)	—	153
	溴邻苯三酚红 CTMAB	pH4.5	660	4.8	(0~50)μg/50ml	1:2:3	154
	铬天青 S-CTMAB、同时测定 Al	pH6.3	615		(0~100)μg/100ml	—	155

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10⁴	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Fe	邻溴二甲基二羧基品红酮-CTMAB	pH=4.0~5.6	680	11.4	(0.04~0.4)μg·ml⁻¹	—	156
	PGR-CPC	pH=4.6~6.0	650	2.91	(0~25)μg/25ml	—	157
	5-溴水杨基荧光酮-CTMAB	pH=5~6	585	15.3	(0~8)μg/25ml	1:3	158
	4,5-二溴邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH6.2	614	14.7	(0~7)μg/25ml	1:2	159
	CAS-CTMAB-乙醇	pH=5.2~6.8	645	22.1	(0~6)μg/25ml	—	160
Ga	CAS-氯化十四烷基吡啶-异丙醇	pH=5.1~5.5	610	22	(0~18)μg/25ml	1:2	161
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=6.5~7.0	555	15.7	(0~5)μg/25ml	—	162
	对氯基苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.2~8.4	550	15.8	(0~10)μg/25ml	1:3:3	163
	4,5-二溴苯基荧光酮-CPB	pH=3.5~6.5	570	13.5	(0~20)μg/50ml	1:2:4	164
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=7.8~8.5	588	25.9	(0~3.5)μg/10ml	1:3:6	165
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH7.0	555	17.0	(0~9)μg/25ml	1:2	166
	邻氯基苯基荧光酮-CTMAB	pH=8.6~9.8	585	15.0	(0.04~0.64)×10⁻⁶	1:3	167
	茜素紫-CPC	pH5.0	610	3.50	(0~50)μg/50ml	1:2	168
	9-吡啶基荧光酮-CTMAB	pH=8.4~9.0	590	29.8	(0~4.0)μg/25ml Ga	1:4	169
	邻氯苯基荧光酮-CPB	pH6	578	17	(0~10)μg/25ml Ga	1:4	170
	邻硝基苯基荧光酮-F-CTMAB	pH=6.3~7.9	576	15	(0~6)μg/25ml Ga	1:2:2:2	171
	5-硝基水杨基荧光酮-CTMAB	pH=7.3~8.0	555	19.1	(0~7)μg/25ml Ga	—	172
	铬青 R-CPB-丙酮	pH4.5	585	25	(0.7~3.6)μg/25ml Ga	—	173
	邻溴二甲基二羧基羟基品红酮-CTMAB	pH=5.6~6.0	670	21.6	(0.04~0.4)μg/ml	—	174
	三溴苯基荧光酮-CTMAB	pH9.4	568	9.6	(0~12)μg/25ml	1:2	175
	邻氯苯基荧光酮-CPB	pH=6.5~8.3	576	13.8	(0~8)μg/25ml		176
	2,6,7-三羟基-9-(4-二甲氨基-3-(4-磺基苯偶氮)苯基)荧光酮	pH8.4	560	53	(0~3.5)μg/25ml	—	177
Ge	2,3,7-三羟基-9取代基荧光酮-CTMAB	(0.4~2.8)mol·L⁻¹ H_2SO_4	512		(0~6)μg/25ml	1:4:4	178
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	4.8mol·L⁻¹ HCl 0.2mol·L⁻¹ HCl	515 540	17 14.2	—	1:4 1:3	179
	水杨基荧光酮-CTMAB	(2.75~5.25)mol·L⁻¹ H_2SO_4	575	15.1	(0~12)μg/25ml	1:2	180
	水杨基荧光酮-CTMAB	1mol·L⁻¹ H_2SO_4	505	19	(0~5)μg/25ml Ge	—	181
	水杨基荧光酮-CTMAB	2mol·L⁻¹ HCl	504~505	17.6	(0~6)μg/25ml Ge	—	182 183
	对氯代苯基荧光酮-CTMAB	1.2mol·L⁻¹ H_2SO_4 + 0.6mol·L⁻¹ H_3PO_4	505	15	(0~7)μg/25ml Ge	—	184 185
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	高酸度 低酸度	505~510 530	>10	(0~8)μg/25ml Ge	1:6 1:4	186
	香草基荧光酮-CTMAB	(0.48~1.92)mol·L⁻¹ HCl 介质	510	12.4	(0~8)μg/25ml	·	187
	邻氯苯基荧光酮-zeph		512	16.0	(0~5)μg/25ml	1:3	188
	9-对氯苯基荧光酮-CTMAB	1.2mol·L⁻¹ H_2SO_4+H_3PO_4	505	15.0	(0~8)μg/25ml	1:3	189
	甲基荧光酮-CTMAB	0.60mol·L⁻¹ HCl	495	12.9	(0~6)μg/25ml	1:3	190
	5′-硝基水杨基荧光酮-CTMAB	3.5mol·L⁻¹ H_2SO_4	514	22.5	(0~3)μg/25ml	1:2	191
	3′,5′-二硝基水杨基荧光酮-CTMAB	1.75~3.0mol·L⁻¹ H_2SO_4	520	18.0	(0~6)μg/25ml	—	192
	苯基荧光酮-CTMAB	HCl 1.2mol·L⁻¹	550.5		(1~6)μg/25ml	—	193

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Ge	5-溴水杨基荧光酮-CTMAB	H_2SO_4 2mol·L^{-1}	505	16.2	(0～8)μg/25ml	1:2:4	194
Hf	溴邻苯三酚红-CTMAB		670	6.3	(0～100)μg/50ml	1:4:4	195
	溴邻苯三酚红-CPB		650	7.4	(0～80)μg/50ml	1:3:3	
Hf,Zr	三溴偶氮胂-TPB	(0.15～0.45)mol·L^{-1} HCl介质	670	13.7	(0～12)μg/25ml	1:2	196
	溴邻苯三酚红-氯化十六烷基三甲铵			7.7	(0～37)μg/25ml	1:3:3	197
Hg	*meso*-四(对磺基苯)卟啉-CTMAB	pH=10～12		23.8	(0～0.8)μg·ml^{-1}	1:1	198
	四(4-三甲铵苯基)卟啉-CPB-乙醇	pH11.0	449	84	0～0.4×10^{-6} Hg	—	199
	meso-四(4-甲基-3-磺基苯)卟啉-CTMAB	pH9.4	446	24.2	(0～12)μg/10ml	1:1	200
	1-(2-吡啶基偶氮)-2-萘酚-CTMAB	pH9.0	555				201
	2,6-二溴-4-甲酰基苯基重氮氨基偶氮苯-溴化十八烷基二甲基苄基铵	pH10.10	470	2.9	(0.5～16)μg·ml^{-1}	1:2	202
	双硫腙-CTMAB	强酸性	500		(0～10)μg/25ml	—	203
In	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=4～7	570	18	(0～15)μg/25ml In_2O_3	1:2:2	204
	邻氯基苯基荧光酮-CTMAB	pH=5.8～6.6	583	19.2	(0～13)μg/25ml	—	205
	茜素紫-CPC	pH=3.5～6.5	620	3.5	(0～50)μg/50ml		206
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.3～8.0	578	16	(0～15)μg/25ml In	1:2	207
	二溴茜素紫-CTMAB	pH=3.0～3.7	610	3.79	(0～3.33)μg/ml In	—	208
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH6.1	575	11.4	(0～10)μg/25ml	—	209
	5-Br-DMPAP-CPC	pH6.5	560	8.6	(0～60)μg/25ml	—	210
La	甲基百里酚蓝-CPB	pH=7.8～11.0	628	8.1	(0～90)μg/25ml La	1:2:4	211
La Ce	偶氮溴膦-PN-CTMAB	(0.2～0.6)mol·L^{-1} HNO_3	680	10.6	(0～25)μg/25ml		212
	偶氮胂Ⅱ-CTMAB	pH3.0	665	15.8(La) 16.6(Ce)	(0～14)μg/25ml La (0～15)μg/25ml Ce	—	213
Mg	二甲基苯胺蓝-CTMAB	pH=10.7～11.3	540	2.6	(0～20)μg/50ml	1:2	214
	二甲酚橙-CTMAB	pH=10.2～10.8	570	2.5	(0～25)μg/50ml	1:2	215
	CAS-CPB	pH=12.2～12.8	650	11.4	(0～10)μg/50ml	1:4	216
	溴邻苯三酚红-CPB	pH=8.7～10.5	680	1.0	(0～120)μg/50ml	1:2	217
	苯基荧光酮-CPB	pH12	607	12.0	(0～12)μg/50ml	1:3	60
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH12	645	11.6	0～1.5μg/10ml Mg	1:2	218
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH10	640	11.0	0～4μg/25ml	1:2	219
Mn	CAS-Phen-CTMAB	pH=10.2～11.3	635	8.0	(0～15)μg/25ml	1:2:1:4	220
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=8.6～9.8	562	13.1	(0～16)μg/25ml	1:2	221
	meso-四(对磺基苯)卟啉-CTMAB	pH=7.8～11.0	442	32	(0～0.125)μg/ml	1:1:8	222
	苯基荧光酮-CTMAB	pH=7.8～9	590	8.1	(0～11)μg/25ml	1:2	223
	CAS-Phen-CTMAB	pH=10.0～11.0	618	9.6	(1～25)μg/25ml	1:1:1:3	224
	5-Br-PAPAP-CTMAB	pH10	568	12.1	(0～17.5)μg/25ml	1:2	225
	漂蓝SB-αα'-联吡啶-CTMAB	pH=9.5～10.5	625	8.3	(0～15)μg/25ml	1:2:2:3	226
	漂蓝6B-phen-CTMAB	pH10	615	7.0	(3.5～17.5)μg/25ml	1:2:1	227
	邻氯苯基荧光酮-F-CPB	pH=9.0～10.4	590	17.2	(0～10)μg/25ml Mn	1:2	228
	吡啶偶氮萘酚-CTMAB	pH9.5	570	9.6	(0～12)μg/25ml Mn(Ⅱ)	—	229
	苯基荧光酮-CTMAB	pH8.5	590	—	(0～10)μg/25ml	—	230
	CAS-CTMAB	pH=9.1～9.2	506	5.8	(0～18)μg/25ml	1:2:2	231

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Mn	T(4-MP)PS_4-H_2O_2-phen-CTMAB	pH=9.15~9.35	420	2230	(0~50)ng/25ml	—	232
Mo	茜素红-CPB	pH=2.6~3.2	500	3.0	(0~150)μg/25ml	1:1	233
	二溴茜素紫-CTMAB	(0.24~0.92)mol·L^{-1} HCl	650	—	(1~25)μg/25ml	2:3:6	234
	二溴茜素紫-CTMAB	(0.2~0.8)mol·L^{-1} HCl	635	1.2		—	235
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	(1.2~2.1)mol·L^{-1} HCl	538	12	(0~5.5)μg/10ml	1:2	236
	间硝基苯基荧光酮-CTMAB	(0.24~0.72)mol·L^{-1}HCl	530	14	(0~8)μg/25ml	1:2	237
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	(0.3~0.6)mol·L^{-1}HCl	530	14.4	(0~16)μg/25ml	1:2	238
	对二乙氨基苯基荧光酮-CPB	pH2.8	532	11	(0~14)μg/25ml Mo(Ⅵ)	1:2:2	239
	水杨基荧光酮-CTMAB	稀 HCl	504	15.5	(0~10)μg/25ml Mo		240
	3,5-二溴水杨基荧光酮-CTMAB	0.5mol·L^{-1} HCl	527	14.4	(0~12)μg/25ml Mo	1:2:2	241
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	0.8mol·L^{-1} H_2SO_4	—	$\Delta\varepsilon$=1.76×10^5	(0~16)μg/25ml Mo		242
	5'-硝基水杨基荧光酮-CTMAB	(0.2~1.0)mol·L^{-1} H_2SO_4	533	14.2	(0~15)μg/25ml Mo	1:2	243
	9-(2'-吡啶基)-2,3,7-三羟基荧光酮-CTMAB	(0.048~0.072)mol·L^{-1}HCl	536	12.5	(0~0.72)μg/25ml Mo	1:1	244
	邻羟基萘基荧光酮-CTMAB	0.2mol·L^{-1} H_2SO_4	514	11.7	(0~10)μg/25ml Mo	1:2	245
	溴邻苯三酚红-CTMAB	—	630	8.9	(0~25)μg/25ml Mo	—	246
	三羟基-4'-磺基偶氮苯-CTMAB	pH=0.4~2.0	460	4.74	(0~40)μg/25ml Mo	—	247
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	(0.16~0.32)mol·L^{-1}的HCl	530	14.2	(0~10)μg/25ml	—	248
	4-醛基苯基荧光酮-CTMAB	—	530	8.3	(0~10)μg/25ml	1:2:2	249
	对氨基苯基荧光酮-CTMAB	H_3PO_4介质	527	8.5	(0~20)μg/25ml	1:2	250
	2,7-二羟基荧光黄-CTMAB	(0.1~0.8)mol·L^{-1} HCl	520	13.0	(0~6)μg/10ml	1:2	251
	芦丁-CTMAB	pH=4.6~5.8	425	4.0	(0~1.6×10^{-5})mol·L^{-1}	1:2	252
	对氯苯基荧光酮-CTMAB	0.65mol·L^{-1} HCl	525	13.7	(0~10)μg/25ml	—	253
	邻(间)氯苯基荧光酮-CTMAB	0.48mol·L^{-1} HCl	530	14.3	(0~14)μg/25ml	1:2	254
	9-(3'-吡啶基)-2,6,7三羟基荧光酮-CPB	(0.045~0.065)mol·L^{-1} HCl	537	11.5	(0~12)μg/25ml	1:1	255
	3,5-二溴邻羟基萘基荧光酮-CTMAB	0.4mol·L^{-1} HCl	525	13.3	(0~3)μg/10ml	1:2	256
	3,5-二溴水杨基荧光酮-CTMAB,同时测Ti	—	—	—	—	—	257
	4-(6-溴-2-苯并噻唑偶氮)焦棓酚-CTMAB	pH3.20	585	5.76	(0~25)μg/25ml	1:2	258
	邻苯二酚紫-CTMAB	pH3.8 0.1mol·L^{-1} H_2SO_4	675 655	4.2 3.46	(6~40)μg/50ml (2~100)μg/50ml	1:1:2	259 260
	DBHPF-CTMAB	强酸	530	11.4	—	—	261
	二溴羟基苯基荧光酮-CPB	(0.3~0.7)mol·L^{-1} HCl	532	11.9	(0~8)μg/10ml	1:2	262
	三羟基-4'-磺基偶氮苯-CTMAB	pH4.5	480~485		(1~50)μg/25ml	1:2	263
	邻羟基萘基荧光酮-DDMBA	—	550	14.7	(0~5)μg/25ml	1:2	264
Nb	水杨基荧光酮-CTMAB	(0.2~0.5)mol·L^{-1}HCl	520	18.5	(0~5)μg/25ml	—	265
	二溴茜素紫-CTMAB	(0.05~0.1)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	640		(5~45)μg/25ml Nb_2O_5	1:1:2	266

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Nb	2,4-二氯苯基荧光酮-CTMAB	(0.4~0.7)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	532	17	(0~25)μg/25ml Nb_2O_5	1∶5∶5	267
	二溴苯基荧光酮-CTMAB(OP)	(1.5~3.0)mol·L^{-1}HCl	540	21	(0~3)μg/10ml	1∶2	268
	溴邻苯三酚红-CPB	pH4.5	620	15.0	(0~60)μg/25ml	1∶3∶3	269
	苯基荧光酮-CPB	(0.18~0.36)mol·L^{-1} H_2SO_4	520	6.5	(0~25)μg/25ml Nb	1∶2	270
	半二甲酚橙-CPB	0.36mol·L^{-1} H_2SO_4	530	3.5	(0~100)μg/50ml Nb_2O_5		271
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	(1.5~3.5)mol·L^{-1}HCl	526	16.8	(0~3)μg/10ml	1∶1∶2	272
Ni	吡啶-CAS-CTMAB	pH=9.8~10.7	650	11.4		—	273
	CAS-芳环氮碱-阳离子表面活性剂	pH=10.5~11.6	636	17.8	(0~5)μg/25ml	—	274
	二甲酚橙-CTMAB	—	614	10.5	(0~9)μg/25ml	—	275
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=9.0~10.2	625	12.9	(1~6)μg/25ml	1∶2	276
	依来铬青R-4,4'-联吡啶-CTMAB	pH=9.3~10.8	605	11.0	(0~12)μg/25ml	1∶2	277
	溴蓝6B-4,4'-联吡啶-CTMAB	pH=9.3~10.8	620		(0~11)μg/25ml	1∶2∶3∶8	278
	邻氯基苯基荧光酮-CPB	pH11.60	598	14.7	(0~6)μg/25ml	1∶2	279
	溴蓝 6B-4, 4'-bipy-CTMAB	pH≈10.5	619		(0~10)μg/25ml Ni	—	280
	溴蓝6B-喹啉-CTMAB	pH=10.0~11.5	638	13.5	(0~18)μg/25ml Ni	1∶2∶2∶4	281
	铬天青S-喹啉-CTMAB	pH=10~11	640	14.8	(0~10)μg/25ml Ni	1∶2∶2∶4	282
	二甲酚橙-CPB	pH9.5	614	5.6	(0~10)μg/25ml Ni	1∶2∶2	283
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=10.2~11.3	610	15	(0~12)μg/25ml Ni	1∶2∶4	284
	水杨基荧光酮-CTMAB,同时测Co	pH7.9	568	2.96	(0~40)μg/25ml	—	285
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH11.5	602	13.8	(0~6)μg/25ml	—	286
	5-(2-噻唑)偶氮-8-氨基喹啉-CPC	pH10.4 硼砂溶液	500	15.4	(0~15)μg/25ml	3∶1	287
	BBTAQ-CTMAB	pH9.5	608	11.5	(0~25)μg·ml^{-1}	1∶4	288
Os	对硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH=7.2~7.8	570	10.0	(0~7)μg/10ml	1∶2	289
Pd	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=6.0~7.0	583	11.7	(0~16)μg/25ml	1∶1	290
	丙基荧光酮-CTMAB	pH=5.8~6.6	570	11.2	(0~14)μg/25ml	1∶2	291
	CAS-CTMAB(及其他)	pH≈5	—	13	—	—	292
	meso-四(4-乙酰氧基苯)卟啉-SDS	pH=3.0~3.8	416	12.0	0~2.5×10^{-7}	1∶1	293
	PAR-CTMAB	pH=5~8	536	2.86	(0~3.6)μg/ml	1∶1	294
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=5.5~7.0	588	11.0	(0~4)μg/25ml	1∶3	295
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=5.6~6.2	610	7.1	(0~20)μg/25ml		296
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.2~7.0	598	11.2	(0~18)μg/25ml	1∶2∶2	297
	铬天青B-CTMAB	pH6.8	635	8.1	(0~22)μg/25ml	1∶1∶3	298
	5-[(对甲氧苯基)偶氮]-8-氨基喹啉-TPB	pH2.4	565	6.7	(0~10)μg/25ml	1∶1	299
	偶氮氯膦-mA-CTMAB	pH=1.5~3.5,HNO_3	630	4.4	(0~12)μg/10ml	2∶3∶2	300
	5-(2'-苯骈噻唑偶氮)-8-氨基喹啉-CTMAB	pH1.5显色,pH11.5测量	625	4.1	(0~25)μg/25ml		301
	8-氨基喹啉-5-偶氮-对苯胂酸-CTMAB	—	610	8.01	(0~19)μg/25ml	1∶3	302
	对溴基苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.6~8.4	598	9.28	(0~5)μg/10ml Pd	1∶3	303 304
	邻氯基苯基荧光酮-CTMAB	pH5.5	610	10.4	(0~10)μg/10ml Pd	1∶1∶2	305

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Pd	对氯基苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.9~7.8	583	8.56	(0~9.0)μg/10ml Pd	1∶3	306
	3',4'-二甲氧基苯基荧光酮-CTMAB	pH8	587	11.1	(0~6)μg/10ml Pd	1∶3	307
	4'-羟基-3'-甲氧基-苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.8~8.0	582	11.4	(0~14)μg/25ml Pd	1∶2	308
	2-(4,5-二甲基噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯甲酸-CTMAB	pH4	695	6.65	(0~16)μg/10ml Pd	—	309
	铬天青S-Zeph	—	620	6.5	(0~24)μg/25ml Pd	—	310
	5-[(对甲基苯基)偶氮]-8-氨基喹啉	pH1.8	565	5.4	(0~21)μg/10ml	1∶1	311
	5-[(偶氮苯基)偶氮]-8-氨基喹啉	pH8.2	694	11	(0~9.0)μg·ml^{-1}	1∶3	312
	5-(α-萘偶氮)-8-氨基喹啉	pH=5.0~5.7	672	6.84	(0~10.5)μg/10ml	1∶4	313
Pb	四(4-三甲铵苯基)卟啉-CPB-乙醇	pH11.0	466	80	(0~4×10^{-7})Pb	—	314
	四(4-甲基-3-磺基苯)卟啉-CTMAB	pH10.5	464	28.2	(0~20)μg/10ml Pb	—	315
	二甲酚橙-CTMAB	pH5	550	2.7	(0~100)μg/25ml Pb	1∶2	316
Pt	DDO-$SnCl_2$-CTMAB	混合溶剂：石油醚+氯仿+异戊醇=3+2+5(浮选)	515	45	(0~180)μg/5ml	–	317
RE	CAS-2,2'-联吡啶-氯化十二烷基吡啶	pH=10.3~10.5	638	22.4	–	1∶2∶1∶4	318
	溴蓝6B-5-硝基邻二氮菲-溴化十二烷基三甲铵	pH=9.0~10.0	628~638	11.5~12.6	—	—	319
	溴蓝6B-5-硝基邻二氮菲-CTMAB	pH=10~10.5	620~639	3.03~19.6	—	1∶2∶1∶4	320
	对马尿酸偶氮氯膦-乙醇-CTMAB	(0.1~0.5)mol·L^{-1} H_2SO_4	682	12.1~18.9	(0~15)μg/50ml	1∶4∶6	321
	溴蓝6B-邻二氮菲-CTMAB	pH=8.0~10.0	633~639	13.5~18.6	—	1∶2∶1∶6	322
	溴蓝6B-邻二氮菲-氯化十二烷基吡啶	pH=7.5~10.5	632~635	13.3~22.1	—	1∶2∶1	323
	偶氮氯膦Ⅳ-CTMAB	(1.5~2.0)mol·L^{-1}HCl	721~723	5.14~6.3	(0~20)μg/25ml	1∶2∶3	324
	偶氮氯膦Ⅰ-CTMAB	1.4mol·L^{-1}HCl	720	5.9~6.5	—	—	325
	氨基G酸偶氮胂-CPB	pH=1.1~2.0	699	16	(0~15)μg/ml CeO_2	1∶1∶2	326
	氨基J酸偶氮氯膦-TPC	(0.1~0.3)mol·L^{-1}HCl	698~700	17.5~20.1	(0~12)μg/25ml Ce	—	327
	氨基C酸偶氮氯膦CPB	(0.08~0.15)mol·L^{-1}HCl	692 61	21.2	(0~10)μg/25ml	—	328
	ECR-2,2'联吡啶-CTMAB	pH=9~10	610	16	(0~20)μg/25ml	1∶2∶1∶6	329
	偶氮氯膦-mA-CPB	pH=0.8~1.8	670		—	1∶4	330
	偶氮氯膦-mA-二苯胍-CPB	pH=1.0~1.8	674	15	—	1∶2∶5∶4	331
	间甲酰基偶氮氯膦-CTMAB	0.1mol·L^{-1}HCl	678~682	5.14~17.1	(0~20)μg/25ml	1∶4∶8	332
	6,8-二磺酸基萘偶氮氯膦-溴化十六烷基(羟甲基)二甲铵	0.3mol·L^{-1}HCl	692.5	10.1~19.2	(0~10)μg/25ml	1∶1∶1	332
	偶氮氯膦-mN-CPB	酸性介质	675	18.8	(0~0.2)μg·L^{-1}		333
	噻唑-CTMAB	pH7.5	570	6.1~8.4	(0~8.0)/25ml CeO_2	1∶3	334
	CAS-Phen-CTMAB	pH=9.3~10.0	630		(0~5)μg/25ml		335
	偶氮氯膦Ⅰ-CTMAB	(0.8~1.6)mol·L^{-1}HCl 适量乙醇	722	5.7~7.03	<20μg/25ml		
	偶氮溴膦-PSN-CTMAB-乙醇	稀HCl-草酸	679	18	(0~8)μg/25ml Ce	1∶4	336
	偶氮氯膦Ⅰ-CTMAB-乙醇	pH4.8	703, 723, 743				337

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
重稀土	8-羟基喹啉-5-磺酸-CPC	pH4.4	390		(0~41)μg/10ml Ho		338
	7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	弱酸性	385	1.5	(0~44)μg/10ml Y	1:6:9	339
Rh	间硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.3~7.5	608	8.89	(0~5)μg/10ml	1:3	340
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=5.5~6.8	595	11.0	(0~10)μg/25ml	1:3	341
	四-(对磺基苯)卟啉-Cd^{2+}-CTMAB	pH9.0	417	59	(0~0.25)μg/ml Rh	1:1	342
	meso-四(对磺酸苯基)卟啉-CTMAB	pH9.0(Cd催化)	416.5	100	(0~1.0)μg/10ml	—	343
Sb	水杨基荧光酮-CTMAB	(0.15~0.2)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	514	9.1	(0~12)μg/25ml	—	344
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	(0.1~0.3)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	535	7.8	(0~10)μg/25ml	1:1	345
	二溴苯基荧光酮-CPB	(0.72~2.2)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	550	5.1	(0~30)μg/25ml	2:3:6	346
	水杨基荧光酮-CPB	pH=1.2~2.2	520	5.8	(0.2~8)μg/25ml	1:3:3	347
	邻硝基苯基荧光酮-CPC	(0.1~0.32)mol·L^{-1} HNO_3	520	9.81	(0~30)μg/25ml Sb	1:1	348
	4,5-二溴邻氯苯基荧光酮-CTMAB	0.64mol·L^{-1} H_2SO_4	554	7.6	(0~20)μg/25ml Sb		349
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	(0.02~0.07)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	521	6.06	(0~25)μg/25ml	2:3:3	350
	偶氮8-羟基喹啉苯基荧光酮-CPB	pH=5~6	562	25.5	(0.5~9)μg/25ml	1:2	351
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	—	578	39.6	—	—	352
Sc	CAS-CTMAB	pH=5.4~6.4	615	18	0~0.2×10^{-6}	1:2:4	353
	苯基荧光酮-CTMAB	pH=8.0~9.0	560	19.5	(0~10)μg/25ml Sc_2O_3	1:1:4	354
	对乙酸基偶氮胂-TPC	pH=2.0~3.0	680	7.65	(0~12)μg/25ml	1:2:3	355
	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=7~10	559	17.5		1:2:4	356
	甘氨酸邻甲酚红-CTMAB	微酸性	540	4.14	(1~13)μg/25ml	1:2:2	357
	酸性 6B-Zeph	pH=5~6	603	18	(0.5~8.0)μg/25ml	1:2	358
	间硝基偶氮氯膦-TPC	(0.2~0.5)mol·$L^{-1}HNO_3$	677	4.5	(1.0~7.0)μg/10ml		359
	间乙酰基偶氮氯膦-CPC	(0.25~0.45)mol·L^{-1}HCl		5.2	(0~8)μg/10ml		360
	铬天青B-CTMAB	pH=3.5~5.0	630	12.8	(0~6)μg/25ml	1:2:3	361
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH4.4	569	13.1	(0~12)μg/25ml Sc	1:2:2	362
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=3.2~3.6	585	15.4	(1.0~7.0)μg/25ml Sc	1:2	363
	偶氮氯膦Ⅰ-溴化正辛基吡啶	(0.05~0.2)mol·L^{-1}HCl	700	2.25	(0~10)μg/25ml Sc	—	364
	铬天青S-CPC	pH=9.4~9.9	550	—	(0~20)μg/25ml Sc_2O_3		365
	埃铬青R-CTMAB	pH=6.2~6.8	615	13.5	(0~7)μg/25ml	1:3	366
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH6.0	560	12.1	(0~6)μg/25ml		367
	2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5-二乙氨基苯酚-CTMAB	pH=5.2~6.9	595	12	(0~30)μg/50ml	1:2	368
	二溴苯基荧光酮-Zeph	pH=2.7~3.3	560	17.2	—	1:2:2	369
	溴邻苯三酚红-三乙烯四胺-CTMAB	pH7.0	640	12	(0~5)μg/10ml	1:2:1:5	370
SO_3^{2-}	三硝基甲苯-CPC	pH8.5	470	2.0	(0~35)μg/10ml SO_3^{2-}	1:1:3	371
Sn	氧化苏木精-CTMAB	pH=0.9~1.2	605	6.0	(0~28)μg/10ml	—	372
	茜素紫-CPB	pH2	530	—		—	373
	二溴茜素紫-CTMAB	(0.24~0.4)mol·L^{-1}HCl	560	—	(0~50)μg/25ml	—	374
	水杨基荧光酮-CTMAB	1mol·$L^{-1}H_2SO_4$	512	—	(0~8)μg/25ml	—	375

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10⁴	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Sn	水杨基荧光酮-CTMAB	(0.25～1.75)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	510	17.9	(0～8)μg/25ml	1:4:4	376
		(0.3～0.6)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	510	15	(0～8)μg/25ml	1:2:1	377
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	(0.15～0.35)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	540	15.2	(0～14.7)μg/25ml	1:2	378
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	(0.075～1.25)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	513	20.1	(0.5～5)μg/25ml	1:4:4	379
	邻苯二酚紫-CTMAB	弱酸性	660	8.8	(0.02～0.5)μg/ml	1:2:3	380
	邻苯二酚紫-CTMAB	pH=2～3	660	8.0	(1～25)μg/50ml	1:2:4	381
	邻苯二酚紫-CTMAB	pH=1.3～1.77	660	—	(2.5～25)μg/50ml	—	382
	对硝基苯基荧光酮-CTMAB	(0.4～0.75)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	515	9.1	(0～15)μg/25ml	—	383
	肉桂基荧光酮-CTMAB	(0.36～0.72)mol·L^{-1}的酸	508	12.5	(0～10)μg/25ml	—	384
	苯基荧光酮-CTMAB-乙醇	0.9mol·$L^{-1}H_2SO_4$	505	18.0	(0～15)μg/50ml	1:2:4:5	385
	2,4-二氯苯基荧光酮	1.5mol·$L^{-1}H_2SO_4$	514	15.0	(0～10)μg/50ml	1:4	386
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	1mol·$L^{-1}H_2SO_4$	510	19.2	(0～10)μg/25ml Sn	1:4	387 388
	对硝基苯基荧光酮-草酸-CTMAB	(0.15～0.55)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	515	12.8	(1～5)μg/25ml Sn	—	389
	香草基荧光酮-CTMAB	稀 H_2SO_4	516	18.4	(0～6)μg/25ml Sn	1:4	390
	水杨基荧光酮-CTMAB	0.5mol·$L^{-1}H_2SO_4$	510	15	—	1:2	391
	邻苯二酚紫-CTMAB	pH=1.5～2.5	660	8.6	(1～25)μg/25ml Sn_2O_2	1:2:4	392 393
	2,3,4-三羟基-4′-磺偶氮苯-CTMAB	0.04mol·$L^{-1}H_2SO_4$	500	—	(0～40)μg/25ml Sn	—	394
	三羟基-4′-磺基偶氮苯-CTMAB	pH0.7	470	9.94	(0～30)μg/25ml Sn	1:2:2	395
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	0.8mol·$L^{-1}H_2SO_4$	*	Δε=1.36×10⁵	(0～16)μg/25ml Sn		396
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB-草酸	(0.5～1.0)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	520	9.7	(0～10)μg/25ml Sn	1:3	397
	氨三乙酸-水杨基荧光酮-CTMAB	pH3.8	532	27.4	(1.34～21.86)μg/25ml		398
	9-(3′-吡啶基)-2,6,7-三羟基荧光酮-CTMAB	稀 H_2SO_4 中	541	16.1	(0～12)μg/25ml	1:2	399
	5-溴水杨基荧光酮-CTMAB	(0.06～0.41)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	535	18.7	(0～12)μg/25ml	1:4:4	400
	水杨基荧光酮-CTMAB	SnH_4 分离	508	17.3	(0～0.40)μg·ml^{-1}	—	401
		(0.5～2.5)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	510	—	(0～16)μg/50ml	—	402
	苯芴酮-溴化十六烷基吡啶	(0.4～0.45)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	510	—	(0～15)μg/50ml	—	403
	5-溴水杨基荧光酮-CTMAB	pH=1.1～3.2	531	17.5	(0～14)μg/25ml	1:4:4	404
	邻羟基萘基荧光酮-溴化十二烷基二甲基苄铵	稀 H_2SO_4	505	16.4	(0～0.48)μg·ml^{-1}	1:2	405
Sr	甲基百里酚蓝-CPB	0.1mol·L^{-1} NaOH	630	2.8	(0～100)μg/25ml Sr	1:2:2	406
Ta	水杨基荧光酮-CTMAB	(0.2～0.5)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	513	19.5	(0～0.8)μg/25ml	—	407
	水杨基荧光酮-CPC		510	29.9		1:2:2	408
	二溴苯基荧光酮-$H_2C_2O_4$-CTMAB	(1.0～1.5)mol·L^{-1}HCl	540	10	(0～45)μg/25ml	1:1:4	409
	二溴苯基荧光酮-酒石酸-CTMAB	(0.06～0.11)mol·L^{-1}HCl	550	12.7		1:2:2:2	410
	二氯苯基荧光酮-CTMAB	(1.0～1.8)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	520	18	(0～40)μg/25ml Ta_2O_5	1:2	411

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Ta	2,7-二羟基荧光素-酒石酸-CPB	(0.3～0.9)mol·L^{-1}HCl	510	20.3	(0～8)μg/25ml	1:2:2:4	412
	邻氯基苯基荧光酮-酒石酸-CTMAB	(0.18～0.6)mol·L^{-1}HCl	510	17.9	(0～12)μg/25ml	1:2:2	413
	溴邻苯三酚红-CPB	pH=2.5～2.6	615	11.0	(0～30)μg/25ml	1:3:3	414
	邻硝基苯基荧光酮-酒石酸-CTMAB	(0.1～0.3)mol·L^{-1}HCl	505	17.0	(0～16)μg/25ml	1:2:2	415
	4,5-二溴邻氯苯基荧光酮-CTMAB	0.48mol·L^{-1} H_2SO_4	562	12.8	(0～16)μg/25ml Ta	1:2	416
	3,5-二溴-4-邻氯苯基荧光酮-CPB	0.8mol·L^{-1} H_2SO_4	523	12	(0～30)μg/25ml Ta	1:3	417
Th	水杨基荧光酮-CTMAB	pH=8.0～8.5	565	19	(0～23)μg/25ml	1:3:2	356
	偶氮氯膦 mN-CTMAB	0.8mol·L^{-1}HCl	680	16.2	(0～25)μg/25ml	1:2:2	418
	氨基G酸偶氮氯膦-TPC	1.8～2.28mol·L^{-1}HCl	698	18.8	(0～25)μg/25ml	1:2	419
	半二甲酚橙-CTMAB	pH=1.5～4.0	550	5.6	(0～20)μg/25ml	1:2	420
	氨基G酸偶氮氯膦-TPC	(1.25～2.0)mol·L^{-1}HCl	704	17.5	(0～0.8)μg/ml	—	421
	氨基C酸偶氮氯膦-CPB	1.5mol·L^{-1}HCl	707	24.0	(0～10)μg/25ml	1:2	422
	4-甲基偶氮胂-pS-CPB	稀 HCl	680	44	(2～6)μg/25ml Th	—	423
	对溴偶氮氯膦-TPC	0.6mol·L^{-1}HCl	695	24.4	(0～8)μg/25ml Th		424
	偶氮溴膦 mK-TPB	(0.05～1.28)mol·$L^{-1}$$HNO_3$	680	8.55	(0～30)μg/25ml Th	1:6	425
	间羧基偶氮氯膦-CPC	(0.28～0.80)mol·L^{-1}HCl 中	685	15.0	(0～10)μg/25ml	1:5	426
	2,3,4-三羟基-4′-磺酸偶氮苯-TPC	pH=2～3.5	460	4.95		1:3	427
	偶氮溴膦-PA	HNO_3,$H_2C_2O_4$	672	9.6	(0～26)μg/25ml	1:6	428
	偶氮溴膦-PA-CPB		692	27	(0～5.5)μg/25ml		
	对马尿酸偶氮氯膦-CTMAB	0.16mol·L^{-1}HCl	684	21	(0～20)μg/25ml	1:2	429
	间硝基偶氮氯膦-CPB	HNO_3	692	13	(0～23)μg/25ml	—	430
Ti	邻苯二酚紫-CTMAB	pH=2.0～2.6	700	3	—	—	431
	二溴苯基荧光酮-CTMAB	(0.5～0.6)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	570	10.9	(0～12)μg/25ml		432
		pH=1.2～1.9	570	19.1	(0～7)μg/25ml	1:2	433
	苯基荧光酮-CTMAB(及其他)	pH=1.2～2.0	540	12.1	(1～8)μg/20ml	—	434
	苯基荧光酮-CPB	0.1mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	540	11	(0～5)μg/25ml	—	435
	苯基荧光酮-CPB	0.087mol·L^{-1} H_2SO_4	535	14.6	(0～10)μg/50ml	—	436
	苯基荧光酮-CTMAB	pH=1.9～2.3	610	11	(0～20)μg·$ml^{-1}$$TiO_2$	—	437
	噻唑-CTMAB	pH=4.0～5.0	520	11	(0～0.75)μg/25ml	1:3:6	438
	二溴苯基荧光酮-氨三乙酸-CTMAB	pH=2.5～4.0	576	21.3	(0～4)μg/10ml	1:2:1:2	439
	过氧化氢-溴邻苯三酚红-CTMAB	pH=4.5～6.0	620	6.6	(0～0.15)μg/ml	1:1:2:4	440
	茜素黄 R-CTMAB	pH=1.4～2.4HCl 或 pH=3.8～4.4 乙酸	450	5.32	(0～15)μg/25ml	1:3	441
	CAS-3,3-二溴邻苯三酚红-CTMAB	pH=1.2～1.5	590	5.70	(0～10)μg/25ml	—	442
	邻苯二酚紫-羟胺-CTMAB	pH3.0	730	9.40	(2～10)μg/25ml	1:2:4:2	443
	ECR-CTMAB	pH2.6	564	4.1	(0～10)μg/25ml	1:4:4	444
	芦丁-CTMAB	pH=4.8～5.8	428	5.6	(0～1.4×10^{-5})mol/L	1:3	445
	溴邻苯三酚红-phen-CTMAB	pH2.5	625	6.5	(0～6)μg/25ml	1:2:1:4	446

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Ti	对氯苯基荧光酮-氨三乙酸-CTMAB	pH=5.8~6.6	573	21	(0~14)μg/10ml Ti	1:3:1:3	447
	5′-硝基水杨基荧光酮-CTMAB	0.35mol·L^{-1} H_2SO_4	548~550	221	(0~2.2)μg/25ml Ti	1:4	448
	5′-溴水杨基荧光酮-CTMAB	(0.1~0.18)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	536	18.1	(0~25)μg/25ml Ti	1:4:4	449
	漂蓝 6B-CTMAB	pH=2.0~2.9	576	5.6	(0~6)μg/25ml Ti	1:2:8 1:4:8	450
	铬天青 B(ECAB)-CTMAB	pH=1.5~2.8	565	8.13	(0~7)μg/25ml Ti	1:2	451
	邻苯二酚紫-三乙醇胺-CTMAB	pH3.0	735	10	0.04~4×10^{-7}	1:2:1:4	452
	二甲酚橙-CTMAB	pH=4~5	485	2.04	(0~12)μg/25ml Ti	1:1:3	453
	水杨基荧光酮-CTMAB	1.5mol·L^{-1}HCl	536	17.5		1:2:2	454
	二溴苯基荧光酮-CPC	pH=1.4~1.8H_2SO_4	570	17.4	(0~4)μg/25ml		455
	间乙酰基偶氮氯膦-CTMAB-乙醇	0.08mol·L^{-1} HCl,乙醇存在	613	3.92	(0~16)μg/10ml	1:3:3	456
	2,3,4-三羟基-4′-磺基偶氮苯-CTMAB	pH=4.6~6.9	480	7.34	(0~16)μg/25ml	1:2	457
	二溴苯基荧光酮-CTMAB			39	(0~12.5)μg/50ml	—	458
	三羟基荧光酮-CTMAB	0.5mol·L^{-1} H_2SO_4	544	25	(0~3)μg/25ml	—	459
	芦丁-CTMAB	pH5.0	430	4.43	(1.2~36)μg/25ml	1:3:2	460
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	0.16mol·L^{-1} H_2SO_4	542		(0~4)μg/25ml	—	461
	邻苯二酚紫-CPB	pH=3~4.5	730	7.8	(2~10)μg/25ml	1:2:3	462
	4-(2-苯并噻唑偶氮)焦棓酚-CTMAB	pH3.0	580	7.01	(0~18)μg/25ml	1:2	463
Tl	茜素紫-CPC	pH5.0	610	14.0	(0~2.5)μg/25ml	1:3	464
U	漂蓝 6B-Zeph	pH=4.5~5.5	617	12.7			465
	水杨基荧光酮-Zeph	pH=2.5~6	555	17.7	(0~1.2)μg/ml	1:2:2	466
	5-Br-PADAP-F-CPC	pH=4.8~6.3	581	8.1	(1~80)μg/25ml	—	467
	5-Br-PADAP-磺基水杨基-CPB	pH=5.5~9.0	595	8.8	(0~20)μg/25ml	1:1:2:8	468
	5-Br-PADAP-F^--CTMAB	pH8	584	7.8			469
	5-Br-PADAP-CTMAB	乙醇	560~575	5.95	(0.5~25)μg/25ml	—	470
V	邻苯三酚红-CTMAB	pH=4.0~6.0	670	2.4	(5~70)μg/50ml	2:3:3	471
	溴邻苯三酚红-CPC	pH=2~3	660	1.2	(0~20)μg/25ml		472
	ECR-CTMAB	pH=5.0~6.0	545	6.63	(0~18)μg/25ml	1:3:3	473
	5-Br-PADAP-过氧化氢-CPB	(0.06~0.12) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	595	12.5	(0~6)μg/50ml	1:1:1	474
	二苯碳酰-CTMAB	pH=4.5~6.0	540	5	(0~25)μg/25ml	1:2:2	475
	铬偶氮酚 KS-乙醇-CPB	pH=3.5~5.6	600	38.0	(0~4)μg/25ml	1:4	476
	芦丁-CTMAB	pH=5.2~5.8	416	1.9	(0~1.6×10^{-5})mol·L^{-1}	1:1	477
	苯基荧光酮-CPB	pH7.5	560	7.8	(0~20)μg/25ml V	1:1:2	478
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH=6.2~6.6	558	11	(0~6)μg/25ml V	—	479
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	pH4.0	560	5.1	(0~30)μg/25ml V	1:2	480
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	pH3.2	540	4.77	(0~20)μg/25ml V	1:3:3	481
	5-溴-水杨基荧光酮-CTMAB	pH6	554	12.7	(0~8)μg/25ml V	1:2:2	482
	二苯卡巴肼-CTMAB	pH5	540		(0~25)μg·ml^{-1} V	—	483
	溴邻苯三酚红-环己二胺四乙酸-CPB	pH=8.0~9.0	640	10.0	(0~12)μg/25ml	—	484

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A：B：C：D)	文献
V	4-(2-吡啶基偶氮)间苯二酚-H_2O_2-CTMAB	pH5，H_2O_2存在	584	4.0	(0～2.5)μg/10ml	—	485
W	二溴茜素紫-CTMAB	(0.8～1.2)mol·L^{-1}HCl	620	8.2	(2～50)μg/25ml	2：3：6	486
	二溴茜素紫-CTMAB	(0.4～1)mol·L^{-1}HCl	610	7.5	(0～25)μg/25ml WO_3	1：1：2	487
	苯基荧光酮-CTMAB	(0.2～0.3)mol·L^{-1}HCl	510	11	(0～80)μg/50ml	—	488
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	(0.4～1.2)mol·L^{-1}HCl	520	13.8	(0～20)μg/25ml	1：3	489
	邻苯三酚红-CTMAB	pH=4.7～5.3	580			1：2：1	490
	芦丁-CTMAB	pH=4.4～5.1	416	5.0	(0～1.4×10^{-5}mol·L^{-1}	1：2	491
	邻氯基苯基荧光酮-CTMAB	(4～6)ml 3mol·L^{-1} H_3PO_4	512	11.0	(0～25)μg/25ml	1：2	492
	邻氯苯基荧光酮-氨三乙酸-CTMAB	(0.2～1.0)mol·L^{-1}HCl	520	12.4	(0～24)μg/25ml W	—	493
	二溴羟基苯基荧光酮-CTMAB	(0.14～0.64)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	522	12.2	(0～8)μg/25ml	1：2：9	494
	水杨基荧光酮-CTMAB，巯基棉分离	HCl，乙醇存在	518		(0～25)μg/25ml		495
	水杨基荧光酮-CTMAB	0.8mol·L^{-1}HCl	518	14.8	(0～20)μg/25ml	1：2：4	496
	水杨基荧光酮-CTMAB，P350萃取色谱分离						497
	4-(2-苯并噻唑偶氮)焦棓酚-CTMAB	pH2.7	555	8.82	(0～28)μg/25ml	1：2	498
Zn	5-Br-PADN-CTMAB	pH=9.5～11.0	550	1.40	(0～30)μg/25ml	1：2	499
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	pH=9.0～10.5	580	8.64	(0～20)μg/25ml Zn	1：2	500 501 502
	四(对磺基苯)卟啉-CTMAB	pH11	427	85	(0～7)μg/25ml Zn	—	503
	铬天青S-半二甲酚橙-CTMAB	pH8.6	525	1.18	(0～50)μg/25ml Zn	—	504
	四(4-磺基苯)卟啉-CTMAB	pH5	428	45.0	(0～3)μg/25ml	1：1	505
	铬天青B-喹啉-CTMAB	pH=8.3～9.2	596	11.3	(0～18)μg/25ml	1：2：2：2	506
	甲基麝香草酚蓝-CTMAB或Tween-80	pH6.1	560		(0～50)μg/50ml	1：2：3	507
	二(8-羟基喹啉)偶氮-二甲基联苯-CPC	pH8	550	7.16	(0～1.25)μg·ml^{-1}	1：2	508
	2-QADNm-羟乙基阳离子表面活性剂	0.24mol·L^{-1} NaOH	530	17.5	(0.013～1.30)μg·ml^{-1}	1：2	509
	PAR-CPC	pH8.5	502		(0～26)μg/25ml	—	510
	双硫腙-CTMAB	pH=9.8～12.4	545	8.92	(0～12)μg/25ml	—	511
Zr	水杨基荧光酮-CTMAB	(0.2～0.3)mol·L^{-1}HCl	512	13.8	(0～10)μg/25ml	—	512
	溴邻苯三酚红-CPB	pH=0.7～1.1	640	3.76	(0～14)μg/25ml	—	513
	苯基荧光酮-CPB	0.1mol·L^{-1}硫硝酸	535	1.1	(1～20)μg/50ml	—	514
	邻苯二酚紫-CTMAB	pH=5.3～6.5	650	5.2	(0.08～0.88)μg·ml^{-1}	1：2：4	515
	半二甲酚橙-CTMAB	(0.2～0.3)mol·L^{-1}HCl	550	7.2	(0～9)μg/25ml	—	516
	半二甲酚橙-CTMAB	(0.12～0.3)mol·L^{-1}HCl	555	4.1	(0～15)μg/25ml	—	517
	氨基G酸偶氮氯膦-CPB	2.4mol·L^{-1}HCl	699	22.2	(0～3)μg/25ml	—	518
	间硝基苯基荧光酮-CTMAB	0.35mol·L^{-1}HCl	538	17.0	(0～7)μg/25ml	1：4：4	519
	偶氮氯膦Ⅰ-CTMAB	(1.2～1.6)mol·L^{-1}HCl	685	4.28	—	—	520
	ECR-CPB	pH=4.0～5.4	570	12.4	—	1：4：6	521

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Zr	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	(1.5～2.5)mol·L^{-1}HCl	545	21.0	(0～10)μg/25ml	1:4	522
	DOABS-CTMAB	pH=1.7～2.4	535	10.0	(0～16)μg/25ml	—	523
	9-正十一烷基荧光酮-CTMAB		515	11.0	(0～12)μg/25ml	—	524
	邻氯基苯基荧光酮-CTMAB	(0.24～0.48)mol·L^{-1}HCl	520	17.0	(0～12)μg/25ml	1:4	525
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB	(0.005～0.05)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	530	13.3	(0～16)μg/25ml Zr	1:4	526 527
	对氯苯基荧光酮-CTMAB	0.16mol·L^{-1}HCl	538	15.4	(0～10)μg/25ml Zr	1:4	528
	DBC-偶氮氯膦-CTMAB-乙醇	1.1mol·L^{-1}HCl	650	6.3	(0～12)μg/25ml Zr		529
	马尿酸偶氮氯膦-CPB-乙醇	(0.25～1.5)mol·L^{-1}HCl	680	11	(0～9)μg/25ml Zr	1:2	530
	铬偶氮酚 KS-CPB-乙醇	pH=2.0～2.8	605	24	(0～4)μg/25ml Zr	—	531
	偶氮胂Ⅲ-TPC	pH=2.5～10	665	18.3	(0～16)μg/25ml	—	532
	4,5-二溴邻硝基苯基荧光酮-CTMAB	(0.8～1.7)mol·L^{-1}HCl 中	538	12.8	(0～8)μg·ml^{-1}	1:4	533
	二甲酚橙-CTMAB	—	605	5.5	—	—	534
	香草基荧光酮-CTMAB	0.3mol·L^{-1}HCl	526	11.9	(0～15)μg/25ml	1:4	535
	邻硝基苯基荧光酮-聚氯亚乙烯(9)-双(2-羟丙基)-双(十八烷基二甲基氯化铵)	0.24mol·L^{-1}HCl	532	12.3	(0～6)μg/25ml	1:2	536
	BPR(溴邻苯三酚红)-CTMAB	—	—	7.7	(0～37)μg/25ml	1:3:3	537
	MTB-CTMAB	(0.25～0.55)mol·L^{-1}HCl	590	22.0	(0～0.73)μg·ml^{-1}	—	538
	二溴羟基苯基荧光酮-CTMAB	2.0mol·L^{-1}HCl	530	14.8	(0～12)μg/25ml	1:4	539

本表参考文献：

1 袁有宪. 化学试剂, 1986; 8(2):85
2 蔡云祥等. 冶金分析, 1984; 4(4):17
3 郑用熙, 姚凤姬. 理化检验(化),1983; 19(3):30
4 蔡云祥, 杨若明. 分析化学, 1982; 10(9):529
5 王东进等. 理化检验 (化), 1986;22(1):2
6 任 英等. 分析化学, 1985; 13(12):881
7 徐民良等. 分析化学, 1988; 16(3):207
8 罗宗铭等. 分析化学, 1988; 16(5):437
9 董沈阳等. 分析化学, 1987; 15(4):302
10 罗宗铭等. 岩矿测试, 1988; 7(2):86
11 马同森等. 河南大学学报(自),1988; (4):69
12 潘祖亭等. 分析化学, 1988; 16(11):970
13 吴心传等. 环境化学, 1989; 8(4):74
14 杨 炯. 理化检验(化),1988; 24(6):351
15 任志华, 何应律, 胡修权等. 岩矿测试, 1991; 10(2):103
16 李秀岭, 吴伟卿, 潘教麦. 冶金分析, 1991; 11(4):17
17 曹秀峰, 王均夏, 侯永根等. 南京师大学报(自),1991; 14(1):52
18 张龙军, 何 玲. 新疆大学学报(自然),1991; 8 (2):60
19 虞光禹. 冶金分析, 1993; 13(1):42
20 陈烨璞等. 分析化学, 1993; 21(2):319
21 谢能泳等. 江汉大学学报, 1993; 10(6):60
22 李士和等. 分析试验室, 1993; 12(6):23
23 孙嘉彦. 干旱环境监测, 1994; 8(4):201
24 庞忠仁等. 湖南有色金属, 1994; 10(5):311
25 邓学琪. 四川有色金属, 1994; (4):22
26 杨振华. 分析化学, 1989; 17(5):450
27 薛 光. 贵金属, 1990; 11(3):42
28 王莉红等. 黄 金, 1992; 13(2):43
29 潘祖亭等. 分析试验室, 1994; 13(1):65
30 汤福隆等. 冶金分析, 1992; 12(4):12
31 潘祖亭等. 高等学校化学学报, 1993; 14(12):1671
32 诸 琪. 分析试验室, 1987; 6(1):25
33 王享芝. 理化检验(化),1988; 24(3):171
34 薛 光. 分析试验室, 1986; 5(6):37
35 薛 光. 地质试验室, 1988; 4(6):365
36 薛 光. 贵金属, 1989; 10(3):40
37 冯孝阳等. 理化检验(化),1989; 25(5):198
38 曾佐涛等. 黄金, 1991; 12(8):53
39 曾佐涛等. 理化检验 (化), 1992; 28(2):70
40 陈秀芬. 浙江冶金, 1991; (1):30
41 陈红波等. 铀矿冶, 1994; 13(1):63
42 王献科等. 新疆有色金属, 1994; (3):48
43 李绍卿. 冶金分析, 1986; 6(3):8
44 丁琍琍. 分析试验室, 1985; 4(5):53
45 罗肇丽等. 分析试验室, 1985; 4(2):23
46 徐其亨等. 冶金分析, 1986; 6(4):10
47 李 镇等. 冶金分析, 1988; 8(1):23
48 乌云平等. 理化检验(化),1987; 23(6):343
49 丘星初等. 环境科学, 1989; 9(5):55
50 鄢国强. 化学世界, 1988; 29(11):501
51 裴世桥等. 岩矿测试, 1991; 10(3):177
52 裴世桥等. 分析化学, 1992; 20(1):97

53 何应律等. 地质试验室, 1992; 8(4):219
54 刘绮洪等. 地质实验室, 1992; 8(6):330
55 刘绮洪. 地质试验室, 1994; 10(2):95
56 韩峭峰等. 岩矿测试, 1994; 13(4):302
57 徐其亨等. 化学学报, 1982; 40(5):419
58 宋汉珩. 冶金分析, 1987; 7(2):18
59 冯 胜等. 分析试验室, 1987; 6(2):26
60 赵书林等. 分析试验室, 1988; 7(8):8
61 舒成宁等. 分析试验室, 1989; 8(6):55
62 李 声等. 分析试验室, 1991; 10(6):31
63 李声稀等. 化学试剂, 1993; 15(2):71
64 王东进等. 冶金分析, 1994; 14(5):1
65 李 镇等. 分析化学, 1986; 14(5):371
66 匡 军等. 分析化学, 1984; 12(8):736
67 陈启定. 冶金分析, 1985; 5(4):16
68 王颖慧等. 天津化工, 1992; (3):41
69 蒸云祥等. 化学试剂, 1982; 4(4):209
70 王迪民. 冶金分析, 1986; 6(2):26
71 杨桂法等. 分析试验室, 1987; 6(11):27
72 潘祖亭等. 分析化学, 1988; 16(11):970
73 徐其亨等. 痕量分析, 1989; 5(2):37
74 揭爱翠等. 化学试剂, 1989; 11(2):108
75 吴其庄等. 分析化学, 1991; 19(6):694
76 黄桂芳等. 地质实验室, 1992; 8(5):264
77 李华民. 地质实验室, 1989; 5(2):63
78 孙淑声. 高等学校化学学报, 1984; 5(4):482
79 徐德良等. 分析化学, 1988; 16(6):535
80 程道炷等. 化学试剂, 1988; 10(1):42
81 郑用熙等. 分析试验室, 1986; 5(4):7
82 王 鹏等. 地质实验室, 1990; 6(4):207
83 敖登高娃等. 内蒙古大学学报(自), 1990; 21(1):104
84 史慧明, 孔令根. 分析试验室, 1991; 10(2):16
85 赵建为, 徐其亨. 冶金分析, 1991; 11(2):1
86 于善珉, 贺 云等. 海湖盐与化工, 1990; 19(3):48
87 卢文安等. 云南冶金, 1994; 23(1):53
88 卢文安等. 冶金分析, 1993; 13(5):8
89 殷志禹等. 云南化工, 1994; (2):27
90 赵建为等. 冶金分析, 1994; 14(6):21
91 戚文彬, 浦炳寅. 化学学报, 1984; 42(1):27
92 李 镇. 冶金分析, 1983; 3(4):206
93 方国祯, 罗济坤. 分析化学, 1985; 13(10):769
94 张 帆等. 高等学校化学学报, 1984; 5(6):791
95 王怀公, 龚国权. 环境化学, 1983; 2(5):50
96 李声稀等. 武汉大学学报(自), 1984; (2):107
97 李声稀等. 环境化学, 1985; 4(1):74
98 吴干卿, 梁德修. 分析化学, 1984; 12(3):209
99 王献科. 分析化学, 1984; 12(10):943
100 龚国权等. 分析试验室, 1982; 1(2):28
101 喻惠群等. 华中师范学院学报(自), 1985; (1):61
102 杨 炯. 理化检验(化), 1987; 23(6):341
103 程道炷等. 分析试验室, 1986; 5(7):35
104 周发连等. 岩矿测试, 1988; 7(4):278
105 沈光惠等. 电镀与环保, 1989; 9(6):23
106 刘玉茹等. 岩矿测试, 1990; 9(3):206
107 朱利中等. 分析化学, 1993; 21(1):22
108 吴志强. 理化检验(化), 1992; 28(6):337
109 何亚楠等. 上海医学检验杂志, 1993; 8(1):22
110 郑礼胜等. 冶金分析, 1993; 13(6):23
111 曹秋娥等. 分析化学, 1995; 23(5):525
112 戚文彬, 胡 利. 高等学校化学学报, 1984; 5(2):261
113 孙慧珠, 林传跃. 兰州大学学报(自), 1983; 19(4):182
114 冯 胜, 王小军. 分析化学, 1982; 10(5):289
115 张明时, 田宝籁. 分析试验室, 1983; 2(2):31
116 詹才清. 理化检验, 1984; 20(2):18
117 王迪民. 分析试验室, 1985; 4(7):16
118 薛 光. 分析试验室, 1986; 5(4):27
119 程道炷等. 冶金分析, 1986; 6(4):1
120 薛 光. 分析试验室, 1986; 5(4):27
121 夏道沛等. 化学试剂, 1988; 10(1):45
122 何淑珑等. 高等学校化学学报, 1986; 7(7):597
123 杨定国. 理化检验(化), 1990; 26(2):98
124 杨素清等. 理化检验 (化), 1989; 25(5):311
125 赵书林, 杨桂法. 冶金分析, 1991; 11(1):8
126 胡 浩. 岩矿测试, 1991; 10(2):114
127 孙嘉彦, 曹志华等. 冶金分析, 1992; 12(3):52
128 王颖慧, 坑 静. 精细石油化工, 1992; (2):50
129 赵 勤, 张德玲. 山东化工, 1992; (1):47
130 胡琴, 解成喜, 李新. 分析化学, 1992; 20(4):446
131 黄青瑜等. 四川大学学报(自), 1991; 28(3):331
132 王玉枝等. 分析试验室, 1992; 11(5):24
133 赵建为等. 云南冶金, 1992; 21(5):51
134 曾佐涛等. 冶金分析, 1993; 13(1):3
135 葛宜宁等. 理化检验(化), 1993; 29(1):4
136 卞立新等. 理化检验(化), 1993; 29(1):51
137 李民菁等. 岩矿测试, 1993; 12(1):79
138 周名成等. 湖南大学学报(自), 1993; 20(5):118
139 赵建为等. 冶金分析, 1993; 13(6):12
140 杜乃林等. 分析测试学报, 1995; 14(1):50
141 陈莉华等. 分析试验室, 1995; 14(2):61
142 龙大钦等. 冶金分析, 1987; 7(5):21
143 邓安民等. 分析试验室, 1983; 1(1):4
144 郑厚德. 分析试验室, 1983; 2(1):16
145 刘绮洪. 分析试验室, 1986; 5(6):27
146 董沈阳等. 分析化学, 1987; 15(4):302
147 刘玉茹等. 岩矿测试, 1986; 5(4):234
148 杨 炯. 理化检验(化), 1989; 25(4):215
149 杨代菱, 余席茂, 余晓梅. 高等学校化学学报, 1989; 10(6):581
150 晋 勇. 理化检验(化), 1989; 25(2):104
151 曹秀峰, 王均夏. 杨州师范学院学报(自), 1990; 10(1):49
152 何久康等. 内蒙古大学学报(自), 1989; 20(3):367
153 孙嘉彦, 顾希玲, 夏 华. 冶金分析, 1989; 8(5):16
154 王献科, 赵广翰. 甘肃化工, 1992; (1):33
155 杜新军, 庞利琴. 地质实验室, 1991; 7(5):274
156 任志华等. 痕量分析, 1992; 8(1):45
157 张文德. 理化检验(化), 1993; 29(3):146
158 缪吉根等. 分析化学, 1993; 21(12):1414
159 张龙军等. 光谱实验室, 1993; 10(6):19
160 韩 文. 冶金分析, 1994; 14(1):52
161 姚凤姬等. 分析试验室, 1984; 3(5):22
162 郭采文等. 分析试验室, 1984; 3(6):17
163 王积祥等. 分析化学, 1985; 13(8):593
164 赵国雄. 分析试验室, 1987; 6(11):21
165 王东进等. 化学试剂, 1986; 8(3):138
166 夏道沛等. 分析化学, 1987; 15(1):59
167 何应律等. 分析化学, 1988; 16(4):341
168 陈海军等. 兰州大学学报, 1986; 22(3):139
169 冯建章, 梅 源. 冶金分析, 1989; 9(4):24
170 左士瑜, 李君虎. 分析试验室, 1989; 8(2):35
171 夏心龙, 邵光均, 陈华序. 冶金分析, 1989; 9(3):20
172 曹诗倜, 卢子良等. 矿冶工程, 1990; 10(1):55
173 戚文彬, 刘丹梓. 岩矿测试, 1989; 8(2):91
174 陈均良, 郑建华等. 分析化学, 1990; 18(7):649
175 侯安新, 王利平等. 地质实验室, 1990; 6(5):259
176 吴曼君. 岩矿测试, 1990; 9(4):256
177 王彝鹏等. 地质实验室, 1994; 10(4,5):274
178 沈含熙, 王连生. 化学学报, 1983; 41(8):700
179 秦光荣, 安莲英. 分析测试通报, 1982; 1(1):30
180 蔡孟礼等. 岩矿测试, 1987; 6(1):30
181 邵明智. 地质实验室, 1989; 5(3):151
182 吴瑞林, 洪英. 稀有金属材料与工程, 1990; (2):64

183 史慧明，孔令根．痕量分析，1989；5(2)：18
184 许光惠，王振清，姚 川．岩矿测试，1989；8(4)：254
185 刘润平等．分析化学，1989；17(7)：602
186 刘润平．稀有金属，1990；14(1)：62
187 汤永强．分析化学，1990；18(9)：封三
188 张玉新，王怀公等．化学试剂，1990；13(3)：146
189 姚 川，许光惠等．分析化学，1991；19(5)：545
190 汤永强．冶金分析，1991；11(2)：56
191 郭兢南，卢子良等．分析试验室，1991；10(3)：13
192 卜立新，陈瑞平．理化检验(化学)，1992；28(2)：93
193 杜乃林等．北方环境，1992；(3)：9
194 邱澄铨等．理化检验(化)，1994；30(4)：206
195 徐其亨．化学试剂，1984；6(3)：19
196 钱 程．痕量分析，1990；(3/4)：85
197 徐邦富等．冶金分析，1993；13(2)：37
198 安兴民．高等学校化学学报，1985；6(11)：977
199 潘祖亭等．分析化学，1988；16(11)：970
200 吴其庄等．化学试剂，1991；13(1)：53
201 王德祯等．上海环境科学，1991；10(4)：27
202 郑建华等．地质实验室，1993；9(3)：139
203 郜琪文等．天津化工，1994；(1)：41
204 陈祥彬等．分析化学，1984；12(2)：135
205 蒋次清等．分析试验室，1988；7(4)：30
206 张仁德等．化学试剂，1987；9(5)：269
207 朱 琳等．冶金分析，1989；9(6)：15
208 林晓梅等．冶金分析，1988；8(6)：21
209 张桃芝等．华中师范大学学报(自)，1994；28(1)：83
210 何治安．冶金分析，1995；15(1)：20
211 孙熹彦等．岩矿测试，1990；9(2)：119
212 杨丽华等．岩矿测试，1987；6(3)：183
213 夏益琼等．云南民族学院学报(自)，1993；2(1)：45
214 王怀公，王 苏．兰州大学学报(自)，1983；19(2)：72
215 匡 军等．分析化学，1984；12(8)：736
216 杨 元，陈远慧．分析化学，1984；12(12)：1052
217 徐其亨等．高等学校化学学报，1985；6(3)：222
218 庄锦英等．分析化学，1989；17(8)：731
219 陈 崖．理化检验(化学)，1991；11(2)：55
220 李 镇．分析化学，1985；13(2)：96
221 周名成等．分析化学，1986；14(3)：213
222 李华民等．分析化学，1984；12(8)：695
223 詹才清．化学世界，1982；23(8)：237
224 夏道沛，赵春光．分析化学，1985；13(12)：923
225 李长华，李 镇．冶金分析，1991；11(2)：55
226 程道炷等．分析化学，1987；15(4)：308
227 程道炷等．冶金分析，1986；6(6)：4
228 王兼鹏，栾日坚等．地质实验室，1990；6(3)：129
229 朱霞石．扬州师院学报(自)，1989；9(1)：43
230 忻永珍．浙江化工，1994；(1)：50
231 范锦莺等．冶金分析，1994；14(5)：44
232 陈秀华等．杭州大学学报(自)，1994；21(4)：413
233 冯 胜，姚汕汕．冶金分析，1984；4(4)：24
234 张志安．冶金分析，1984；4(4)：59
235 沈含熙．理化检验(化)，1983；19(1)：4
236 王东进等．分析化学，1984；12(2)：140
237 许光惠等．分析试验室，1985；4(7)：1
238 王振清等．痕量分析，1985；(3～4)：117
239 曾胜年等．武汉大学学报(自)，1990；(1)：92
240 史慧明等．痕量分析，1989；5(2)：18
241 谢能泳等．冶金分析，1989；9(3)：14
242 史慧明等．分析化学，1989；17(10)：879
243 郭兢南等．湖南冶金，1990；(1)：43
244 沈含熙等．冶金分析，1989；9(5)：1
245 莫蔚明等．冶金分析，1990；10(2)：5
246 黄德江．北京化工学院学报(自)，1988；15(3)：91
247 余建平等．冶金分析，1990；10(3)：51
248 王振清等．理化检验(化)，1986；22(6)：341
249 周荣农等．分析试验室，1986；5(11)：10
250 吴干卿等．冶金分析，1987；7(6)：16
251 李焕然等．分析化学，1988；16(5)：464
252 徐民良等．分析化学，1988；16(3)：207
253 黎心懿，张华山，姚建．冶金分析，1991；11(3)：9
254 张华山，张红兵．冶金分析，1991；11(6)：3
255 沈含熙，翟秀敏．化学试剂，1991；13(3)：129
256 李 声，余席茂等．化学试剂，1992；14(1)：4
257 蔡汝秀等．化学学报，1991；49(12)：1467
258 周华方等．理化检验(化)，1992；28(5)：267
259 周志航等．分析试验室，1992；11(5)：26
260 张 统等．理化检验(化)，1994；30(1)：31
261 欧忠平等．冶金分析，1993；13(4)：58
262 陈同森等．理化检验(化)，1993；29(6)：336
263 马学军．理化检验(化)，1994；30(2)：105
264 冯泳兰等．冶金分析，1994；14(5)：17
265 沈含熙等．冶金分析，1982；2(6)：1
266 容庆新等．高等学校化学学报，1985；6(9)：793
267 吴干卿等．痕量分析，1985；(2)：63
268 王东进等．高等学校化学学报，1983；4(6)：809
269 施绍银．冶金分析，1987；7(5)：4
270 沈乃葵，赵化章．冶金分析，1988；8(6)：515
271 郭光熙．分析化学，1990；18(6)：541
272 罗宗铭等．分析化学，1990；18(7)：672
273 詹才清．理化检验(化)，1984；20(1)：51
274 孙淑声，李 宁．化学试剂，1984；6(3)：163
275 刘 钢等．分析试验室，1987；6(3)：20
276 何应律等．岩矿测试，1986；5(3)：190
277 李 镇等．冶金分析，1988；8(1)：23
278 程道炷等．冶金分析，1988；8(3)：15
279 李声韬等．冶金分析，1988；8(2)：28
280 程道炷，李 镇．理化检验(化)，1988；24(5)：281
281 夏道沛，张建军，杨林凤．分析化学，1989；17(8)：734
282 夏道沛，李海萍等．岩矿测试，1989；8(3)：185
283 郑恩铭．冶金分析，1989；9(6)：54
284 赛音，姚俊学．内蒙古大学学报(自)，1989；20(1)：82
285 黄育瑜，廖晓军．冶金分析，1991；11(4)：55
286 晋 勇．冶金分析，1991；11(4)：54
287 卢文安，徐其亨，周中万．云南化工，1992；(1)：30
288 卢文安等．云南化工，1993；(2)：39
289 赵 力，胡守坤．分析化学，1992；20(5)：584
290 李声韬等．分析化学，1985；13(12)：926
291 李声韬等．分析试验室，1986；5(1)：30
292 孙淑声，李 力．分析测试通报，1985；4(3)：14
293 王东进等．化学试剂，1987；9(1)：47
294 胡守坤等．分析试验室，1986；5(8)：23
295 胡守坤等．分析试验室，1987；6(7)：27
296 胡守坤等．理化检验(化)，1987；23(2)：92
297 李声韬等．理化检验(化)，1986；22(5)：265
298 杨定国等．分析化学，1988；16(7)：651
299 赵建为，徐其亨．贵金属，1991；12(3)：45
300 朱利亚，吴瑞林．贵金属，1991；12(2)：57
301 杨桂法，杨 震等．分析试验室，1991；10(6)：3
302 赵建为，周 洁等．云南冶金(科)，1991；20(6)：51
303 胡守坤等．理化检验(化)，1990；26(2)：103
304 曾钟智等．四川大学学报(自)，1989；26(4)：474
305 蒋次清等．贵金属，1989；10(3)：52
306 胡守坤等．四川大学学报(自)，1989；26(3)：336
307 胡守坤等．分析化学，1990；18(3)：250
308 胡守坤等．分析试验室，1989；8(5)：13
309 张 帆等．福州大学学报(自)，1988；16(3)：194
310 黄德江等．化学试剂，1989；11(6)：373
311 石国荣等．化学试剂，1992；14(2)：85
312 杨桂法等．分析试验室，1992；11(5)：1
313 杨桂法等．化学试剂，1993；15(3)：129

314 潘祖亭等. 分析化学, 1988; 16(11):970
315 程介克等. 化学学报, 1989; 47(5):438
316 李国秀. 云南冶金(科),1989; 18(6):49
317 李保山. 石油化工, 1991; 20(8):558
318 慈云祥, 杨明敏. 化学试剂, 1983; 5(1):7
319 孙淑声, 沈小铜. 化学试剂, 1984; 6(1):52
320 孙淑声, 沈小铜. 科学通报, 1983; 28(4):220
321 戴崇谦. 理化检验(化),1988; 24(1):24
322 孙淑声. 北京大学学报(自),1984; (2):41
323 张 文. 分析试验室, 1983; 2(2):8
324 罗庆尧等. 冶金分析, 1982; 2(1):1
325 冀中忻. 分析测试通报, 1983; 2(2):50
326 蔡汝秀等. 冶金分析, 1983; 3(1):7
327 黎心懿等. 高等学校化学学报, 1983; 4(5):553
328 过乃蓉等. 科学通报, 1982; 27(19):1178
329 慈云祥, 赛 音. 科学通报, 1982; 27(23):1433
330 刘绍璞, 刘忠芳. 冶金分析, 1984; 4(5):16
331 陈达仁, 姚国梅. 分析测试通报, 1983; 2(4):21
332 胡可人等. 分析试验室, 1984; 3(5):28
333 董煜心等. 理化检验(化),1985; 21(2):77
334 任 英, 董玉兰. 分析化学, 1982; 10(10):601
335 孙若诚. 理化检验(化),1984; 20(4):32
336 卢 蔚, 李 莹. 冶金分析, 1990; 10(4):56
337 王星堂等. 稀土, 1990; 11(3):35
338 王乃兴等. 分析化学, 1989; 17(10):960
339 王乃兴等. 应用化学, 1990; 7(1):49
340 程书麟等. 光谱实验室, 1993; 10(4):6
341 胡守坤等. 分析化学, 1987; 15(9):814
342 程书麟等. 分析化学, 1989; 17(8):70
343 李华民, 姚亚东. 理化检验(化),1991; 27(5):301
344 沈含熙, 许光惠. 冶金分析, 1983; 3(2):67
345 李焕然等. 中山大学学报(自),1983; (2):59
346 陆 勇, 张志安. 分析试验室, 1983; 2(5):13
347 吴心传等. 分析试验室, 1985; 4(7):12
348 曾华珖等. 兰州大学学报(自),1989; 25(4):69
349 许光惠等. 南开大学学报(自),1989; (1):18
350 钱和生, 朱惠依. 理化检验(化),1991; 27(1):20
351 侯安新等. 分析化学, 1992; 20(7):765
352 王东进等. 分析化学, 1994; 22(6):643
353 杜士奎. 理化检验(化),1982; 18(3):5
354 胡可人等. 理化检验(化),1982; 18(6):7
355 蔡汝秀, 夏 光. 武汉大学学报(自),1983; (3):53
356 孙淑声, 陈小谷. 北京大学学报(自),1985; (4):32
357 任 英, 张亚飞. 应用化学, 1985; 2(1):43
358 周始民, 郑用熙. 化学试剂, 1983; 5(4):198
359 周执明等. 分析试验室, 1986; 5(6):46
360 周执明等. 理化检验(化),1987; 23(2):72
361 乌云平等. 冶金分析, 1987; 7(4):31
362 罗宗铭等. Talanta, 1990; 37(6):641
363 罗宗铭等. 地质实验室, 1989; 5(5):255
364 顾丽忠等. 分析化学, 1989; 17(7):656
365 沈 坚. 江西有色金属, 1989; 3(1):49
366 罗宗铭, 连小文等. 冶金分析, 1990; 10(6):4
367 杨定国. 岩矿测试, 1991; 10(3):209
368 王献科. 分析化学, 1991; 19(3):297
369 杨志斌等. 南昌大学学报(理),1993; 17(2):57
370 江淑美等. 分析测试学报, 1994; 13(6):46
371 冯亚平等. 环境化学, 1989; 8(4):63
372 赵 俭. 理化检验(化),1982; 18(3):5
373 吴湘华. 理化检验(化),1983; 19(3):30
374 吴湘华, 丁红星. 冶金分析, 1986; 6(1):67
375 汪丽定, 母宗绪. 稀有金属, 1984; 8(3):54
376 许光惠, 沈含熙. 分析化学, 1982; 10(6):334
377 段学臣, 郑沛霖. 分析试验室, 1982; 1(2):4
378 刘润平. 分析试验室, 1984; 3(1):21
379 沈含熙, 王连生. 化学试剂, 1983; 5(5):262
380 侪宗文, 郭玉兰. 分析试验室, 1982; 1(1):15
381 赵兰英. 化学试剂, 1984; 6(3):182
382 郭春山, 陈 凯. 冶金分析, 1982; 2(1):27
383 吴湘华等. 分析试验室, 1986; 5(7):26
384 许光惠等. 分析试验室, 1988; 7(2):17
385 李金声. 分析试验室, 1987; 6(4):63
386 叶能心等. 冶金分析, 1987; 7(5):26
387 刘润平等. 分析化学, 1989; 17(7):602
388 刘润平. 冶金分析, 1989; 9(5):47
389 朱利亚等. 冶金分析, 1989; 9(3):17
390 林维明等. 理化检验(化),1989; 25(5):281
391 段学臣. 湖南有色金属, 1990; 6(2):46
392 李 锐等. 有色矿冶, 1989; (4):40
393 赵兰英等. 职业医学, 1989; 16(5):37
394 高诚祥等. 理化检验(化),1989; 25(6):339
395 余建平等. 理化检验(化),1989; 25(2):116
396 史慧明等. 分析化学, 1989; 17(10):879
397 陈自若. 矿冶工程, 1989; 9(2):45
398 黄桂芳, 李文涛. 岩矿测试, 1991; 10(1):38
399 沈含熙, 瞿秀敏. 分析化学, 1991; 19(1):115
400 邱澄铨等. 理化检验(化),1993; 29(1):15
401 毛陆原等. 郑州大学学报(自),1992; 24(4):82
402 李永国. 电镀与环保, 1993; 13(4):26
403 王 萍. 湖南冶金, 1992; (6):37
404 龙文清等. 冶金分析, 1994; 14(6):56
405 冯泳兰等. 岩矿测试, 1994; 13(4):309
406 孙嘉彦等. 地质实验室, 1990; 6(3):140
407 沈含熙等. 冶金分析, 1982; 2(6):1
408 高隆元等. 岩矿测试, 1986; 5(2):97
409 秦光荣等. 化学试剂, 1983; 5(6):347
410 容庆新等. 分析测试通报, 1983; 2(4):26
411 奚干卿等. 分析化学, 1986; 14(4):281
412 陈志澄等. 化学试剂, 1986; 8(3):14
413 罗宗铭等. 岩矿测试, 1987; 6(3):210
414 施绍银等. 冶金分析, 1987; 7(3):6
415 罗宗铭等. 分析化学, 1987; 15(1):56
416 王振清等. 冶金分析, 1989; 8(6):12
417 沈雪明. 冶金分析, 1990; 10(3):18
418 金桂珍. 冶金分析, 1984; 4(2):1
419 黎心懿等. 分析化学, 1984; 12(3):190
420 薛 光. 分析化学, 1984; 12(10):928
421 廖克敏等. 理化检验(化),1984; 20(6):5
422 过乃蓉. 分析化学, 1987; 15(2):105
423 储志军等. 分析试验室, 1990; 9(2):30
424 彭召海等. 分析化学, 1989; 17(4):340
425 王化南等. 岩矿测试, 1988; 7 (3):189
426 廖喜漫, 徐钟舞, 潘教麦. 理化检验(化),1991; 27 (6):324
427 徐永辉. 原子能科学技术, 1991; 25(3):57
428 沙玫君等. 上海工业大学学报, 1992; 13(3):278
429 王建兴等. 冶金分析, 1993; 13(6):9
430 王木林等. 内蒙古大学学报(自),1995; 26(1):54
431 曾垂富, 余建平. 冶金分析, 1982; 2(6):53
432 杨淑芬. 冶金分析, 1983; 3(4):251
433 陈淑群等. 中山大学学报(自),1983; (3):51
434 刘绍璞, 刘忠芳. 化学世界, 1982; 23(4):107
435 赵化章等. 中国科学技术大学学报, 1982; (4):147
436 吴太白等. 分析化学, 1983; 11(7):529
437 张海铭, 马克良. 分析试验室, 1983; 2(1):21
438 陈玉绶等. 高等学校化学学报, 1985; 6(1):33
439 王东进等. 分析化学, 1984; 12(9):819
440 张德良等. 化学试剂, 1982; 4(1):5
441 陈玉绶等. 分析试验室, 1987; 6(3):25
442 曹洪科. 分析试验室, 1987; 6(2):10
443 张德良等. 分析化学, 1986; 14(7):498
444 吴静波等. 分析化学, 1986; 14(11):860

445 杨桂法等. 冶金分析, 1986; 6(3):10
446 杨定国. 高等学校化学学报. 1986; 7(8):689
447 王东进等. 岩矿测试, 1990; 9(2):115
448 曹侍侗等. 冶金分析, 1990; 10(3):1
449 李声韬等. 武汉大学学报(自),1989; (3):71
450 程道炸等. 理化检验(化),1990; 26(3):165
451 余建平等. 冶金分析, 1988; 8(5):53
452 张德良等. 分析化学, 1989; 17(6):520
453 邓恢祥等. 湖南有色金属, 1988; 4(5):49
454 高丽君. 云南冶金(科),1990; 19(4):70
455 段群章, 谢佐才等. 冶金分析, 1991; 11(5):39
456 顾丽忠, 吴德怀等. 理化检验(化),1991; 27(3):140
457 张 云. 冶金分析, 1992; 12(2):46
458 马光华等. 理化检验(化),1992; 28(4):248
459 卢子良等. 矿冶工程, 1992; 12(2):61
460 林建原. 江西有色金属, 1992; 6(3):185
461 李万选等. 分析测试通报, 1992; 11(6):61
462 刘 钢等. 冶金分析, 1995; 15(1):23
463 周华方等. 冶金分析, 1995; 15(1):12
464 张仁德等. 分析化学, 1988; 16(2):111
465 姜辅舜. 冶金分析, 1984; 4(2):17
466 袁锡英. 分析化学, 1984; 12(3):183
467 谢炳锻. 分析化学, 1982; 10(7):403
468 薛 光. 化学试剂, 1984; 6(1):48
469 陈金妹. 铀矿地质, 1989; 5(1):52
470 孙良实. 铀矿冶, 1993; 12(4):276
471 徐其亨等. 冶金分析, 1984; 4(4):30
472 王怀公等. 冶金分析, 1984; 4(5):26
473 夏道沛. 分析化学, 1983; 11(11):845
474 吴太白等. 分析化学, 1984; 12(8):743
475 李绍卿等. 分析化学, 1986; 14(2):129
476 刘绍璞等. 科学通报, 1987; 32(12):912
477 徐民良等. 分析化学, 1988; 16(3):207
478 蔡炔中等. 冶金分析, 1990; 10(2):40
479 李声韬等. 分析试验室, 1989; 8(5):26
480 徐其亨等. 分析试验室, 1988; 7(12):33
481 郭志英. 冶金分析, 1989; 9(5):48
482 李声韬等. 冶金分析, 1989; 9(4):30
483 郝殿义等. 天津化工, 1989; (4):59
484 蔡耀中, 钟力军. 化学试剂, 1990; 12(6):332
485 揭念琴, 林小治. 化学试剂, 1990; 12(3):190
486 沈含熙. 化学试剂, 1982; 4(2):79
487 陈志澄等. 理化检验(化),1983; 19(5):42
488 蔡宝石等. 冶金分析. 1984; 4(3):24
489 许光惠等. 冶金分析, 1986; 6(2):4
490 郑斯运. 分析化学, 1983; 11(9):684
491 徐民良等. 分析化学, 1988; 16 (3):207
492 王振消等. 理化检验(化),1987; 23(5):268
493 罗宗铭等. 化学通报, 1989; (6):42
494 欧忠平, 潘教麦等. 理化检验(化),1991; 27(5):259
495 张贵珠, 史慧明. 分析化学, 1991; 19(8):952
496 陈伟莉. 稀土. 1991; 12(6):47
497 张忠信, 江瑜, 王驰. 青海师大学报(自),1991; (1):47
498 周华方等. 分析试验室. 1994; 13(4):21
499 杨桂法等. 冶金分析, 1986; 6(3):10
500 晋 勇. 分析试验室, 1988; 7(11):9
501 晋 勇. 四川有色金属, 1989; (3):45
502 晋 勇. 四川环境, 1990; 9(1):52
503 潘祖亭, 徐勉懿, 刘晓秀. 高等学校化学学报, 1989; 10(2):140
504 邓恢祥. 环境污染与防治, 1989; 11(4):40
505 黄桂芳, 阮 慎. 冶金分析, 1991; 11(6):41
506 夏道沛, 李海萍. 分析化学, 1990; 18(8):760
507 汤仲禧. 冶金分析, 1991; 11(3):15
508 王玉枝等. 岩矿测试, 1992; 11(4):339
509 张正奇等. 化学试剂, 1992; 14(5):271
510 齐美玲等. 沈阳药学院学报, 1993; 10(3):191
511 何 斌. 干旱环境监测, 1993; 7(4):199
512 沈含熙等. 化学试剂, 1982; 4(5):257
513 王怀公等. 冶金分析, 1983; 3(4):217
514 吴太白等. 冶金分析, 1983; 3(4):215
515 杨定国等. 冶金分析, 1984; 4(6):20
516 李玲颖等. 冶金分析, 1985; 5(3):20
517 薛 光. 冶金分析, 1986; 6(1):33
518 陈震华等. 化学世界, 1984; (10):373
519 沈含熙等. 分析化学, 1983; 11(8):576
520 席全美. 理化检验(化),1984; 20(1):11
521 李志良等. 分析化学, 1985; 13(12):920
522 杨卫华等. 冶金分析, 1988; 8(4):98
523 董沈阳等. 分析化学, 1987; 15(4):302
524 杨桂法等. 分析试验室, 1987; 6(11):27
525 徐其亨等. 理化检验(化),1988; 24(3):147
526 刘润平. 理化检验(化),1989; 25(4):235
527 刘润平等. 分析化学, 1989; 17(7):602
528 王振清, 沈含熙等. 冶金分析, 1990; 10(3):15
529 任 英, 古丽冰. 分析测试通报, 1990; 9(2):76
530 曾胜年, 夏益琮等. 分析试验室, 1989; 8(5):63
531 余建平, 曾垂富. 分析试验室, 1989; 8(1):62
532 雷立红, 肖国光. 矿冶工程, 1991; 11(1):63
533 徐弘, 吴铮等. 华东师大学报(自),1990; (4):56
534 吴太白. 冶金分析, 1992; 12(3):55
535 汤永强. 冶金分析, 1991; 11(3):51
536 周名成等. 湖南大学学报(自),1993; 20(2):48
537 徐邦富等. 冶金分析, 1993; 13(2):37
538 刘绣华等. 冶金分析, 1995; 15(2):41
539 付佩玉等. 理化检验(化),1995; 31(3):143

表 17-9 含有阴离子型表面活性剂的体系的吸光光度分析法应用示例

元素 (A)	体系 (B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比 (A : B : C : D)	文献
Ag	PADMA-十二烷基硫酸钠	pH=6~10.5	530	6.7	0~1.2mg·L^{-1}	1:2	1
	曙红-Phen-十五烷基磺酸钠	pH=4.5~5.5	550	5.5	(0~35)μg/50ml	—	2
	5-Br-PADAP-十二烷基硫酸钠	pH=5.8~8.0	542	6.5	0~1.6×10^{-6}	—	3
	硫代米蚩酮-SDBS	pH4	540	8.91	(0~20)μg/25ml Ag	1:2	4
	2-[3,5-二氯-2-吡啶偶氮-5-]二乙氨基苯酚-SDS	pH=4.7~6.5	568	7.5	(0~17)μg/25ml	1:2	5
	3,5-二溴吡啶偶氮二乙基氨基苯酚-SDS	pH=3~8	570	7.7	(0~25)μg/25ml	1:2	6
	5-溴吡啶偶氮二乙基氨基苯酚-SDS	pH5.5	550	6.5	(0~20)μg/25ml		7

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Ag	2-[3,5-二溴-2-吡啶偶氮]-5-二乙氨基苯酚-SDS	pH5	565	6.4	(0~0.48)μg·ml^{-1}	1∶2	8
	硫代米蚩酮-十二烷基硫酸钠	pH3.5	535		(0~12)μg/25ml	—	9
		pH6.8	545	11.4	(0~18)μg/25ml	1∶2	10
Au	硫代米蚩酮-SLS	pH4.5	560	—		—	11
	硫代米蚩酮-SDBS	pH3	550	·	(0~52)μg/25ml Ag	—	12
	硫代米蚩酮-SDS	—	555	11.0	(0~1)μg·ml^{-1}	1∶4	13
	硫代米蚩酮-SDS(NH_2OH·HCl存在下)可测0.5g·L^{-1}(金)	—	—	—	—	—	14
Be	漂蓝6B-十二烷基硫酸钠	pH=6.1~6.5	615	11.1	(0.25~4)μg/25ml	1∶1	15
Bi	四(4-磺酸萘基)卟啉-SLS	pH5.9	465	17	(0~1.1)μg·ml^{-1}	1∶1	16
Cd	1-(2-吡啶基偶氮)-2-萘酚-O/W型微乳液(微乳液,含水量α=75%的O/W型SDS-正丁醇-正庚烷-水	pH9.5	540	2.07	(0~40)μg/10ml		17
	α、β、γ、δ-四(乙-氯苯基)卟啉-十二烷基硫酸钠(α,α联吡啶存在)	··	432	44	(0~3)μg/10ml	1∶1	18
Co	二甲基噻唑偶氮二乙胺基酚-十二烷基硫酸钠	pH=8.4~11.5	614	6.14	(0~20)μg·ml^{-1}	1∶2	19
	o,o'-二氨基偶氮苯-SDBS	pH8.5	610	1.20	—		20
	四(4-乙酰氧基苯)卟啉-SDS	pH7.8	436	24.0	0~200μg·L^{-1}Co	1∶1	21
	四(苯基)卟啉-咪唑-SDS	pH9.0	435	30.2	(0~1.0)μg/10ml Co	1∶1	22
Cr(Ⅲ)	2-[2-(5-溴吡啶)偶氮]-5-二甲氨基酚-SDS	pH4.5	586	8.40	—	—	23
Cu	ECR-联吡啶-十二烷基硫酸钠	pH=10.2±0.5	575	4.6	(0~159)μg/50ml	1∶1∶1	24
	5-Br-PADAP-十二烷基硫酸钠	pH=4~7	545	8.7	(0~12)μg/25ml	1∶2	25
	3,5-二溴-PADAP-十二烷基硫酸钠	pH=2.8~3.8	492	8.26	(0~0.28)μg/ml	1∶1	26 27
	meso-四(4-甲氧基苯基)卟啉-SDS	pH5显色pH<4.3测定	418	39.0		···	28
	四苯基卟啉-SDS	pH4.7	414	42.0	(0~3.3)μg/25ml	1∶1	29
	4-(3,5-二溴-2-吡啶偶氮)-*N*-乙基-磺基丙替苯胺-SDS	pH5	580	8.12	(0~78.5)μmol·L^{-1}	···	30
	meso-四(4-甲基-3-磺基苯)卟啉-十二烷基硫酸钠	pH4.9	414	38.5	(0~1.2)μg/10ml	1∶1	31
	APAAQ-SDBS	pH5.4	550	9.15	(0~8)μg/10ml	1∶3	32
	meso-四(3-溴-4-羟基-5-甲氧苯基)卟啉-十二烷基苯磺酸钠	pH4.5	420	24	(0~6)μg/25ml	1∶2	33
	T(3-M-4-HP)P-DBS	pH5.7	428	47.6	(0~0.8)μg/10ml	1∶2	34
Cu,Fe	5-Cl-PADAB-SDS	pH6	530	Cu5.2 Fe6.0	(0~12)μg/10ml Cu (0~10)μg/10ml Fe		35
Fe	2-[2-(5-溴苯并噻唑)偶氮]-5-二甲氨基苯甲酸-SDS	pH6	646	8.0	(0~20)μg/25ml Fe(Ⅱ)	—	36
	2-[2-苯并噻唑偶氮]-5-二乙氨基苯甲酸SDS	pH=5.0~7.5	641	9.0	(0~10)μg/25ml	1∶2	37
	5-Cl-PADAB-SDS	pH=4.5~7	530	6.0	(0~25)μg/25ml	1∶2	38
	5-Br-PADAP-SDBS	pH=4.5~6	565	9.5	(0~20)μg/50ml		39
	5-Me-BTAMB-SDS	pH6	640	10.2	(0~3.5)μg/25ml	—	40
Hg	3,5-二溴-PADAP-十二烷基磺酸钠	pH=7.8~9.0	570	11.0	(1~15)μg/25ml	1∶2	41
	3,5-二氯PADAT-十二烷基苯磺酸钠	pH=3.8~5.0	520	5.11 7.0	(0.1~2.88)μg·ml^{-1}	1∶2∶1	42
Ge	4,5-二溴苯基荧光酮-十二烷基硫酸钠	5.3mol·$L^{-1}H_2SO_4$	509	17.7	(0~7)μg/25ml	1∶4	43
Mn	1-(2-吡啶基偶氮)-2萘酚-O/W型微乳液(微乳液:SDS∶正丁醇∶正庚烷=0.27∶0.63∶0.1,含水量为58%)	pH9.5	510	3.79	(0~18)μg·ml^{-1}	—	44

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Ni	二甲基噻唑偶氮二乙胺基酚-十二烷基硫酸钠	pH=7.3~10.2	578	7.25	(0~31)μg/25ml	1:2	45
	二甲基噻唑偶氮-8羟基喹啉-5-磺酸十二烷基磺酸钠	pH=2.8~4.2	620	11	(0~10)μg/25ml	1:2:4	46
	3,5-二溴-PADAT-十二烷基硫酸钠	pH=4.5~5.5	567	11.7	(0~10)μg/25ml	1:1	47
	2-(3,5-二氯-2-吡啶偶氮)-5-二甲氨基苯胺-SDS	pH5	586	11.7	(0~0.4)μg/ml	—	48
	2-[2-苯并噻唑-偶氮]4-甲基-5-二羧甲基苯甲酸-SDS	微酸性	605	8.07	(0~10)μg/25ml	1:2	49
	2-(5-溴-2-噻唑偶氮)-5-二乙氨基苯甲酸-SDS	pH5.0~8.0	642	12.3	(0~10)μg/25ml	1:2	50
	噻唑偶氮羧酸-十二烷基硫酸钠	pH6	605	8.07	(0~10)μg/25ml	—	51
	噻唑偶氮二羧甲氨基苯甲酸-SDS	pH6	600	2.79	(0~0.6)μg·ml^{-1}	1:2	52
	硝基苯并噻唑偶氮二甲氨基苯甲酸-十二烷基硫酸钠	pH6.2	650	11.6		1:1	53
Pd	四(4-吡啶)卟啉-SDS	pH4.4	444	35	(0~3)μg/25ml Pd		54
	四-(4-三甲铵基苯基)卟啉-SDBS	pH3.2	436	570	(0~1.1)μg/25ml Pd	—	55
Rh	四(2-氯苯基)卟啉-SDBS	pH3		530	(0~0.7)μg/25ml Rh^{3+}		56
	四(4-三甲铵基苯基)卟啉-SDS	pH9.0	417	51.7	(0~2.4)μg/25ml Rh	1:1	57
	α,β,γ,δ-四(3-甲氧基-4-羟基苯基)卟啉-SDS	pH6.0	460	280	(0.3~1.0)μg/25ml	1:1	58
Sc	CAS-三乙烯四胺-十二烷基硫酸钠	pH=6.2~8.5	610	10	(0~8)μg/25ml	1:2	59
	漂蓝6B-羟基(聚氧乙烯)磺酸钠	pH=6.5~7.5	660	24.7	(0~5)μg/25ml	1:1	60
Sn	9-(2-吡啶基)-2,6,7-三羟基荧光酮-SDS	0.1 mol·L^{-1} H_2SO_4	536	15.8	(0~12)μg/25ml	1:4	61
V	噻唑偶氮二乙氨基苯甲酸-SDS	pH=3.10~3.78	576	25.9	(0~0.5)mg·L^{-1}	—	62
Y	CAS-Phen-羟基(聚氧乙烯)磺酸钠	pH=7.2~8.4	645	19.8	(0~12)μg/25ml	1:2:2	63
Zn	1-[2-吡啶偶氮]-2-萘酚-微乳液(微乳液:含水量85%的O/W型SDS-正丁醇-正庚烷-水)	pH=7.7~10.0	550	5.15	(0~8.4)μg/10ml	1:2	64
	四-(4-乙酰氧基苯)卟啉-SDS	pH5.5	435	50.2	(0~70)μg·L^{-1}	1:1	65
Zr	5-Br-PADAP-十二烷基硫酸钠	(0.1~0.3)mol·L^{-1}硝酸	634	13.5	(0~18)μg/25ml		66

本表参考文献:

1 洪水皆等. 化学学报,1982;40(3): 251
2 阮敏达. 理化检验(化),1986; 22(1): 24
3 廖克敏等. 分析试验室, 1985; 4(4): 62
4 马国中等. 冶金分析, 1989; 9(4): 55
5 张 光, 刘 彬, 王 勇等. 贵金属, 1991; 12(2): 63
6 刘 然, 洪 琨. 铀矿地质, 1991; 7(6): 367
7 陈亚华, 李德亮, 杨爱芹. 冶金分析, 1990; 10(4): 47
8 柴华丽, 张晓菊. 复旦学报(自), 1992; 31(1): 115
9 章道昆等. 云南冶金(科), 1992; 21(4): 51
10 应 敏等. 黄 金, 1994; 15(3): 48
11 马国中. 冶金分析 1988; 8(5): 52
12 谭龙华, 郑松岩. 岩矿测试, 1989; 8(1): 66
13 杨金祥. 分析化学, 1991; 19(4): 487
14 张秀英, 马国中. 河南师大学报(自), 1990; (3): 88
15 郑用熙等. 分析试验室, 1986; 5(4): 7
16 方 梅等. 理化检验(化), 1994; 30(4): 219
17 朱霞石, 郭 荣等. 扬州师院学报(自), 1991; 11(2): 49
18 吴彩桑等. 华侨大学学报(自), 1992; 13(2): 191
19 郑用熙等. 分析试验室, 1986; 5(4): 7
20 刘玉茹等. 岩矿测试, 1989; 8(1): 17
21 王东进, 吴其庄等. 化学试剂, 1989; 11(4): 240
22 吴其庄, 王东进等. 高等学校化学学报, 1989; 10(3): 299
23 刘润平. 分析试验室, 1990; 9(2): 32
24 邹时复等. 分析化学, 1984; 12(6): 525
25 夏道沛等. 分析化学, 1985; 13(5): 366
26 潘祖亭等. 痕量分析, 1985; (1): 63
27 潘祖亭等. 高等学校化学学报, 1985; 6(8): 696
28 陈朝阳, 黄泽兴, 何淑琼. 中华预防医学杂志, 1990; 24(4): 227
29 朱玉瑞, 肖晓龙, 吴晓静. 合肥工业大学学报(自), 1991; 14(3): 107
30 吴从山. 临床检验杂志. 1992; 10(1): 9

31 吴其庄等. 冶金分析, 1992; 12(6): 11
32 杨桂法等. 理化检验(化), 1993; 29(4): 220
33 杨霞等. 湖南大学学报(自), 1994; 21(4): 51
34 骆国钧等. 理化检验(化), 1994; 30(6): 351
35 刘雪美等. 中国环境监测, 1994; 10(6): 22
36 张 光等. 理化检验(化), 1990; 26(1): 3
37 张光, 傅业伟, 杨合情等. 冶金分析, 1992; 12(2): 1
38 刘雪美等. 中国环境监测, 1992; 8(2): 20
39 王献科等. 有色金属与稀土应用, 1993; (2): 35
40 樊学忠等. 华东师范大学学报(自), 1993; (3): 69
41 刘锡林等. 环境化学, 1983; 2(6): 45
42 刘玉茹等. 分析化学, 1985; 13(5): 363
43 曹小安等. 理化检验(化), 1994; 30(3): 163
44 朱霞石等. 理化检验(化), 1991; 27(1): 31
45 郑用熙等. 冶金分析, 1986; 6(1): 9
46 刘锡林等. 分析化学, 1984; 12(4): 246
47 谢能咏等. 分析化学, 1985; 13(8): 617
48 韩 权. 冶金分析, 1991; 11(4): 10
49 樊学忠, 吴斌才等. 理化检验(化), 1992; 28(1): 4
50 张小玲, 张 光等. 分析化学, 1992; 20(4): 374
51 樊学忠等. 理化检验(化), 1992; 28(4): 195
52 樊学忠等. 岩矿测试, 1993; 12(1): 31
53 张光等. 分析试验室, 1995; 14(1): 19
54 徐勉懿, 潘祖亭等. 分析试验室, 1989; 8(3): 4
55 李友芬, 谢春玲. 分析化学, 1989; 17(5): 545
56 李友芬. 湘潭大学自然科学学报, 1988; 10(4): 55
57 曾孟金, 程书麟. 贵金属, 1989; 10(3): 43
58 李友芬等. 湘潭大学自然科学学报, 1990; 12(2): 88
59 白继昌等. 化学试剂, 1984; 6(2): 118
60 白继昌等. 分析化学, 1985; 12(8): 743
61 沈含熙, 翟秀敏. 分析试验室, 1990; 9(6): 9
62 陈展光等. 湖南大学学报(自), 1993; 20(2): 32
63 白继昌等. 分析试验室, 1985; 4(7): 14
64 朱霞石, 郭 荣. 分析化学, 1992; 20(4): 452
65 王东进等. 化学试剂, 1988; 10(5): 266
66 沈含熙等. 化学试剂, 1986; 8(2): 63

表 17-10 含有非离子型表面活性剂的体系的吸光光度分析法应用示例

元素 (A)	体系 (B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比 (A:B:C:D)	文献
Ag	硫代米嗤酮-Triton X-100	pH=3~6.3	500	10.1	(0~10.5)μg/25ml	1:3	1
	镉试剂-Tween-80	pH=9.2~9.8	525	8.6	(0~15)μg/25ml	—	2
	DiCl-DMAAB-OP	(0.1~0.3)mol·L^{-1}NaOH	570	4.42	(0~25)μg/25ml	1:2	3
	5-Cl-PADAB-OP	pH=4~7	513	6.19	(0~30)μg/25ml	—	4
	TEDAT-Tween-80	pH4.0	540	12.0		1:4	5
	荧光桃红 B-Phen-动物胶	pH=4.7~9.2	571	3.81	(0~42.8)μg/25ml	1:2:1	6
	硫代米蚩酮-Tween-80	pH=3.3~6.8	540	6.6	(0~20)μg/25ml	1:2	7
	镉试剂 2B-OP	pH=9.3~10.0	560	10.2	(0~15)μg/25ml	—	8
	硫代米蚩酮-Tween-80	pH4.5	530	9.2	(0~12)μg/25ml Ag	—	9
	四(N-甲基-3-吡啶基)卟啉-OP	pH9.6	425.5	35.6	(0~12)μg/25ml Ag	1:1	10
	邻羟基苯基重氮氨基偶氮苯-三乙醇胺-Triton X-100	pH10.2	545	12.8	(0~7)μg/25ml	1:3	11
	金试剂-OP	pH=4.5~6.5	505	10.0	(0~10)μg/25ml	1:4	12
	phen-四氯四溴荧光素(荧光桃红 B)-OP	pH=3.8~6.0	575	9.45	(0~20)μg/25ml	—	13
Al	CAS-OP	pH=5.8~6.7	615	11.3	(0.02~0.24)μg·ml^{-1}	—	14
	CAS-Triton X-100	pH=6.2~7.1	640		(0~15)μg/50ml	—	15
		pH=6.3~6.8	610	12	(0~15μg/50ml	—	16
		pH6.8	640	12	(0~8)μg/50ml	—	17
	嘧唑-Triton X-100	pH=7~8.5	550	9.45	(0~12)μg/50ml	1:2	18
	苯基荧光酮-F^--TritonX-100	pH=9.5~11.0	554	13.0	(0~5)μg/25ml	1:2	19
	水杨基荧光酮-F^--TritonX-100	pH9.5	548	15	(0~4)μg/25ml Al	1:2	20
	氯磺酚 S-TritonX-100-丙酮	pH5	660		(0~20)μg/25ml Al	1:1	21
	铬天青 S-OP	pH6.7	600	7.43	(0~10)μg/50ml Al	--	22
	水杨基荧光酮-OP	pH9.5	555	13.4	(0.025~4.8)μg/25ml		23
As	结晶紫-钼酸铵-OP	0.13mol·L^{-1}硫酸	545	17	(0~15)μg/25ml	—	24
	砷、铋、钼杂多蓝-tween-80	0.35mol·L^{-1} HNO_3	680	2.8	(0~60)μg/50ml	—	25
	砷钒钼杂多酸-乙基紫-OP-10	0.28mol·L^{-1} H_2SO_4	555	19.0	(0~5.0)μg/25ml	—	26
	砷钼杂多酸-孔雀绿-OP	0.145~0.176 mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	600		(0~18)μg/25ml	A:C=1:3	27
	孔雀绿-砷钼蓝-TritonX-305	$[H^+]$=0.56mol·L^{-1}	640	11.3	(0~7)μg/25ml As		28
Au	硫代米蚩酮-Triton X-100	pH=2.9~4.5	560	15	(0~25)μg/25ml		29

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10⁴	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Au	硫代米蚩酮-Tween-80	pH=2.5~4.5	560	14.6	(0~15)μg/25ml	1∶2	30
	金试剂-TritonX-100	pH=3.5~5.6	565	16.5	(0~20)μg/25ml	1∶4	31
	丁基罗丹明 B-KI-OP-明胶	pH=2~3	610	59.0	(1.0~8.0)μg/ml	—	32
	硫代米蚩酮-OP	pH=2.0~4.0	550	12	(0~50)μg/25ml Au	—	33
	硫代米蚩酮-TritonX-100	pH=2.5~4.3	555	14.3	(0~10)μg/25ml Au	—	34
	硫代米蚩酮 Tween-80	pH3.3	—	—	(0~0.4)μg·ml^{-1}	—	35 36
	金试剂-OP	pH=3.0~5.0	560	16.8	(0~15)μg/25ml	1∶4	37
	硫代米蚩酮-Tween-20	pH3.0	555	15.3	(0~35)μg/25ml	—	38
	硫代米蚩酮-Tween-80	pH3.3	555		(0~10)μg/25ml	—	39
	硫代米蚩酮-Tween-80	pH=2.4~4.5	555	17.5	(0~30)μg/25ml	—	40
B	姜黄素-TritonX-100		555	32	(0~0.75)μg/25ml	—	41
Be	CAS-聚氧乙烯烷基酚	pH=5.8~6.5	615	12	(0~5)μg/50ml	—	42
	CAS-OP	pH5.1	605	9.6	(0~4.5)μg/25ml	—	43
		pH=4.0~6.0	620	8.75	(0~5)μg/25ml	—	44
	CAS-Tween-20	pH6.8	615	12.8	(0~1.6)μg/25ml	1∶1	45
	CAB-OP	pH=5.5~7.5	615	8.78	(0~2.0)μg/25ml		46
	苯基荧光酮-OP	pH=7.5~9.5	545	7.56	(0~2)μg/25ml Be	1∶2	47
	对溴偶氮胂-TritonX-100	pH=6.0~7.4	610	4.5	(0~1.6)μg/25ml Be	—	48
Bi	水杨基荧光酮-Tween-80	pH=1.8~2.5	520	9.4	(0~15)μg/25ml	1∶3	49
	3,5-二溴-DMDAP-Tween-8	pH=1.7~3.0	600	6.0	(0~10)μg/25ml	1∶1	50
	5-Br-PADAP-OP	pH=3.1~7.2	582	14.9	(0~12)μg/25ml	1∶2	51
	邻硝基苯基荧光酮-OP	pH2.1	532	7.08	(0~35)μg/25ml	1∶2	52
	3,5-二溴吡啶偶氮间氨基酚-OP	pH3	566	8.26	(0~50)μg/25ml	1∶2	53
	水杨基荧光酮-OP	pH=1.4~2.5	520	8.16	(0~20)μg/25ml Bi	—	54
	3,5-二氯-DEPAP-OP	pH9	580	13.2	(0~18)μg/25ml Bi	—	55
	2,3,4-三羟基-4'-磺-偶氮苯-Triton-X-100	0.12mol·L^{-1} HNO_3	490	—	(0~100)μg/25ml Bi	-	56
	罗丹明 B-碘化铋-N3001	—	—	—	—	—	57
Ca	1,5-二(2-羟基-5-氯苯基)-3-氰基甲臜(HCPCF)-Tween-80	pH=12.3~13.0	660	4.5	—	1∶2	58
	三溴偶氮胂-平平加	pH10.4	620		(0~40)μg/25ml Ca	1∶2	59
	对羧基偶氮羧-OP	0.05mol·L^{-1}柠檬酸	718	15.2	(0~0.4)μg·ml^{-1}	—	60
Cd	5-Br-DMPAP-Triton X-100	pH=8.5~9.0	554	10.7	—	—	61
	3,5-二溴-DMPAP-Tween-80	pH=8.5~9.5	585	12.9	—	1∶2	62
	5-Br-PADAP-Triton X-100	pH=8.0~10.0	575	12	(0~45)μg/50ml	1∶2	63
	1-(2-吡啶基)-5-苯基-3-(2-呋喃基)甲臜(PPFF)-Tween-80	pH=9.4~12.0	655	6.08	(0~23)μg/50ml	1∶2	64
	1-(6-溴-2-苯并噻唑偶氮)-2-萘酚(Br-BTAN)-OP	pH=12~13	480	8.8	—	—	65
	苯重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH=10~10.5	525		(0~10)μg/25ml	—	66
	5Br-PNPFF-Tween-80	pH=8.5~9.5	690	6.3	(0~6.7)μg/10ml	1∶4	67
	(4-邻羟基苯基三氮烯)偶氮苯-Triton X-100	pH10.2	525	19.2	(0~9)μg/25ml	—	68
	镉试剂 2B-TritonX-100	—	505		(0~10)μg/25ml	—	69
	5-Br-PADAP-OP	pH9.0	560	10.0	(0~4.5)μg/5ml	—	70
	1-(5-溴-2-吡啶偶氮)-2,7-萘二酚(5-Br-PADN)-Tween-80	pH9.5	560	5.4	(0~1.2)μg·ml^{-1}	—	71
	5-Br-PADAP-OP	pH9.0	558	11.5	(0~0.56)μg·ml^{-1}	1∶2	72
	2,4-二硝基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH11.8	525	16.8	(0~6)μg/25ml	1∶2	73
	苯重氮氨基苯对偶氮苯-OP	0.08mol·L^{-1} $NH_3·H_2O_2$	522	15.0	(0~5)μg/25ml	—	74
	对偶氮苯重氮氨基偶氮苯磺酸-Triton X-100,同时测 Ni,Hg,Cu	—	532	22.0	(0~15)μg/25ml	—	75
	氨替比林基重氮氨基偶氮苯-Tween-80	pH=10.5~12	530	21.1	(0~10)μg/25ml	1∶2	76

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Cd	2,6-二溴-4-氨磺酰基苯基重氮氨基偶氮苯(DBSDAA)-Triton X-100	pH11.0	530	20.5	(0~10)μg/25ml	1:3	77
	四-(4-甲氧苯基)卟啉-OP-Tween-80	pH8.5	438.5	48.5		—	78
	光泽精-SCN-Triton X-100	pH6	504	49.1	(0~1.5)μg·ml^{-1}	—	79
	罗丹明 B$^+$-[$CdBr_3$]$^-$-Triton X-100	0.02mol·L^{-1} HNO_3	578	15.5	(0~12)μg/25ml Cd	—	80
	3,5-DiCl-DEPAP-OP	pH=8.9~9.5	570	11.9	(0~18)μg/25ml Cd	1:2	81
	3,5-DiBr-PADAP-OP	pH9.5	572	13	(0~12)μg/25ml Cd	1:2	82
	新镉试剂-OP	pH10.4	520	16.4	(0~4)μg/25ml Cd	—	83
	镉试剂 2B-Tween-20	pH10	510	14	(0~4)μg/25ml Cd	—	84
	镉试剂 pB-TritonX-100	pH10.5	515	4.5	(0~3)μg/25ml Cd	1:2	85
	邻羟基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH=9.3~10.9	525	19.7	(0~10)μg/25ml Cd	1:3	86
	对甲氧基苯氨基重氮偶氮苯-Tween-80	pH12	505	12	(0~12)μg/25ml Cd	—	87
	对磺酸基苯重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH11	520	16.7	(0~4)μg/50ml Cd	—	88
	对偶氮苯重氮氨基偶氮苯磺酸-TritonX-100	pH10.0	532	20.2	(0.1~12)μg/25ml Cd	—	89
	[4-(3-羟基-6-磺基苯)三氮烯]偶氮苯-TritonX-100	pH10	526	20.2	(0~8)μg/25ml Cd	—	90
	4-(邻重氮氨基苯胂酸)-偶氮苯-Tween-80-SDBS	pH=11.5~13.0	520	18.5	(0~12.5)μg/25ml Cd	—	91
	二种二溴羧基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH10.2	520, 508	22.1 11.2	(0~10)μg/25ml	—	92
	卟啉试剂(T(4-MOP)P)-Tween-80	pH=9~12	440	29.5	(0~4.0)μg/25ml	1:1	93
	二溴甲酰基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH=9.5~10.22	510	9.8	(0~15)μg/25ml	1:3	94
	三种卤素膦酸基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH=10.5~10.8	523	18.0	(0~12)μg/25ml	1:3	95
	安替比林基重氮氨基二硝基苯-Triton X-100	pH11	540	15.2	(0~15)μg·ml^{-1}	1:2	96
	间氯苯重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH10	490	11.1	(0~15)μg/25ml	1:2	97
	二种溴代硝基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	弱碱性	495, 504	1.56, 1.50	(0~8)μg/25ml (0~10)μg/25ml	—	98
	卟啉试剂(T(BHMOP)-Tween-80	pH8.5	442	22.9	(0.008~0.720)μg·ml^{-1}	—	99
Co	5-Br-PADAP-Triton X-100	pH=2~3	592	12.5	(0~15)μg/25ml	1:2	100
	噻唑偶氮-二乙基氨基酚-Triton X-100	pH=4~9	580		(0~0.8)μg·ml^{-1}	1:2	101
	5Br-PADAP-OP	pH4.6	585	9.8	(0~25)μg/50ml	1:2	102
	TAMB-TritonX-100	pH=3.8~5.8	668	12.0	(0~10)μg/25ml	1:3	103
	3,5-DiBr-PAEB-TritonX-100	pH=2.1~5.4	673	15.2	(0~0.5)μg·ml^{-1}	1:3	104
	5-Br-PADAP-OP	pH4	590	10.5	(0~26)μg/25ml Co	1:2	105
	5-Br-PADNm-Triton X-100	pH5	547	13.5		1:2	106
	5-(对硝基苯基偶氮)-8-氨基喹啉-Triton X-100	pH10.8	650	8.3	(0~15)μg/250ml	1:2	107
	镉试剂 2B-Triton X-100	pH=10~11.5	530	5.89	(0~12)μg/25ml	1:2	108
	镉试剂 2B-Triton X-100(少量乙醇存在)	pH9.1	530	11.2	(0~12)μg/25ml	1:2	109
	5-(对硝基苯偶氮)-8-(对甲苯磺酰氨基)-喹啉-Tween-80	pH10.2	645	8.6	(0~6)μg/25ml	1:3	110
	5-(4-硝基苯偶氮)-8-氨基喹啉-Tween-40		650	7.07	(0~20)μg/25ml		111
	2-[2-(6-溴苯并噻唑)偶氮]-5-二甲氨基苯甲酸-Tween X-100	pH=6.3~8.5	660	12.7	(0~12)μg/25ml	1:2	112
	2-[2-(5-溴苯并噻唑)偶氮]-5-二甲氨基苯甲酸-Triton X-100	pH6.3	660	12.2	(0~12)μg/25ml	1:2	113

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Co	氯氨磺酰基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH10.7	537	17.3	(0～8)μg/25ml	1:2	114
	PAN-Tween-80	pH=4.0～7.0	580	4.9	(0～10)μg/25ml	—	115
	PAN-OP	pH5.2	580	2.2	---	—	116
Cr	5-Br-PADAP-H_2O_2-OP	pH=5.5～6.5	610		(0～20)μg/50ml	1:1:1	117
	CAS-OP	pH=4.5～5.0	625	12.0	(0～14)μg/50ml	1:3	118
	5-Br-PADAP-OP，可测 Co	弱酸介质	595	8.46	(0～15)μg/25ml	1:2	119
	4,5-二溴苯基荧光酮-Tween-60	pH=7.5～9.0	585	17.4	(0～6)μg/25ml	1:2	120
	2,7-二溴茜素紫(DBV)-OP	HCl-H_3PO_4	416	2.74	(0～30)μg/25ml	1:3	121
	二安替比林-邻氯苯基甲烷-Tween-20[Mn(Ⅱ)存在]	H_3PO_4 介质	480	13.7	(0～10)μg/25ml		122
	二安替比林苯乙烯甲烷(DASTM)-Tween-80 Mn(Ⅱ)存在下	H_3PO_4 或 H_3PO_4-H_2SO_4	546	45.5	(0～0.8)μg/25ml		123,124,125
	二溴羟基苯基荧光酮-Triton X-100	0.56mol·L^{-1} H_2SO_4	510	2.3	(0～25)μg/25ml	—	126
	铍试剂Ⅱ-OP	pH6.0	595	2.25	(0～15)μg/25ml	1:2	127
Cu	4,4'-四乙基二胺二苯甲硫酮-OP	pH=3.4～7.2	500	13.3	(0～10)μg/25ml	1:4	128
	铜试剂 A-Tween-80	pH=9.2～9.8	495	11.3	(0～18)μg/50ml	1:2	129
	5-Br-DMPAP-OP	pH=8.5～11.0	550	8.7	(0.01～0.6)μg·ml^{-1}	1:2	130
	4,7-二苯基邻二氮菲-Triton X-100	pH=6.0～9.5	462	1.2	(0～40)μg/25ml	1:2	131
	噻唑-聚乙烯醇	pH=6.2～9.8	560	8.5	(0～10)μg/50ml	1:4	132
	溴邻苯三酚红-聚乙烯醇	pH=4.7～5.7	650	1.3	(0～150)μg/50ml	1:2	133
	3,5-二氯-DEPAP-OP	pH=6～9	560	9.40	(1～10)μg/25ml	1:2	134
	曙红-新亚铜灵-OP	pH=4.9～5.4	546	6.60	(0～7.5)μg/25ml	1:2:1	135
	3,5-二溴-PADAP-OP	pH=7～10		10.0	(0～12)μg/25ml	1:2	136
	丁基罗丹明 B-KI-OP	(0.006～0.025)mol·L^{-1}	610	21.6	(0.2～12)μg/10ml		137
	5-Br-PADAP-OP	pH=7.2～9.5	530	15.0	(0～16)μg/25ml	1:2	138
	硫代米蚩酮-Tween-20	pH=3.8～7.9	500	12.0	(0～15)μg/25ml	1:4	139
	3,5-DiBr-DEPAP-OP	pH7.8	575	9.24	(0～9)μg/25ml Cu	1:3	140
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH8.5	560	11.4	(0～5)μg/5ml Cu	—	141
	3,5-DiBr-PADAP-平平加	pH=7.0～10.2	575	9.26	(0～9.0)μg/25ml Cu	—	142
	铬天青 S-phen-TritonX-100	pH=7～9	610	6.82	(0～10)μg/25ml Cu	2:1:2	143
	硫代米蚩酮(TMK)-OP-Brij-35	2mol·L^{-1} HAc 还原，pH4.3 显色	500	11.4	(0～9.443)mol·L^{-1}	—	144
	TMK-Tween-80	pH5	500	10.2	(0～10)μg/25ml	1:4	145
	新铜试剂-Triton X-100，同时测 Cu^{2+}	pH=3～4.0	455	0.76	(0～100)μg/25ml		146
	4,7-二苯基-1,10-菲罗啉(BPT)-Triton X-100，同时测 Fe^{2+}	pH=3.4～5.6	462		(0～50)μg/25ml	—	147
	2,9-二甲基-1,10-菲罗啉-真曙红-Tween-80	pH=5.06～5.68	562	18	(0～7)μg/25ml	1:2:1	148
	5[(4-二乙氨基苯基)偶氮]-8-羟基喹啉-Tween-80	pH=6.5～8.7	530	6.19	(0～1.5)μg/ml	1:2	149
	二乙基二硫代氨基甲酸钠(DDTC)-OP	pH=8.0～9.5	455	1.33	(0～120)μg/25ml	1:2	150
	DDTC-OP		460	2.12	(0～40)μg/25ml		151
	p-NPAQ-Tween-80	pH10	614	4.1	(0～11.6)μg/25ml	1:4	152
	p-NPAQ-Tween-60	碱性介质	605	5.92	(0～20)μg/25ml	1:2	153
	5,10,15-三(4-磺酸苯基)-20-[4-[3-[4-[10,15,20-三(4-磺酸苯基)-5-卟啉基]苯氧基]丙氧基]苯基]卟林-Tween-60	pH4	416,440	78	(0～0.8)μg/10ml	2:1	154
	5-对硝基苯偶氮-8-对甲磺苯酰氨基喹啉-Tween-80	Hp9.4	605	4.8	(0～25)μg/25ml	1:1	155
	双卟啉($DTPPS_8$)-Tween-60	pH=3.0～4.5	416	35.2	(0～1.2)μg/10ml	2:1	156
	铜试剂 A，铜试 2B-Triton X-100	pH=9.5～11.0，pH=8.3～9.5	550，540	13.5，11.3	(0～10)μg/25ml	1:3～1:2	157

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Cu	PAN-Triton X-100	pH3.0	Cu550 Ni565	1.8 3.5	(0～100)μg/50ml (0～55)μg/50ml	— —	158
	1-(2-噻唑偶氮)-2-萘酚-4-磺酸-Triton X-100	pH3.0	530	2.06	(0～20)μg/25ml	—	159
	4,4'-双苯偶氮基重氮氨基苯-Triton X-100	pH10.5	534	15.2	(0～10)μg/25ml	—	160
	5-Br-PADAP-OP	pH5	560	7.1	0.10%～1.50%	—	161
	5-溴水杨基荧光酮-Tween-80	pH6.5	560	11.8	(0～7)μg/25ml	1:2	162
	CAS-OP 微乳液	pH10	550	3.5	(0～30)μg·ml^{-1}	—	163
	PAN-Triton X-100	pH3.0	Cu550 Ni565	1.8 3.5	(0～100)μg/50ml (0～55)μg/50ml	— —	164
	锌试剂-OP	pH=4.0～10.5	620	2.0	—	—	165
	5-Br-PADAP-OP	pH9.0	557	9.3 12	(0～12.5)μg/25ml	—	166
	3-溴-4(2溴-4-硝基苯基重氮氨基)偶氮苯-Triton X-100	pH7.8	512	12.2	(0～8)μg/25ml	—	167
	PAN-Triton X-100 微乳液	pH2.8	556	2.3	(0～30)μg/25ml	—	168
Fe	SCN-phen-OP	(0.15～0.6)mol·L^{-1}硫酸	520	1.74	(0～55)μg/25ml		169
	PADAP-OP	pH=6～8	762	3.18	(0～1.6)μg·ml^{-1}	1:2	170
	5-Br-PADAP-Triton X-100	pH5.0	746	2.6	(0～1.2)μg·ml^{-1}	1:2	171
	4,7-二苯基邻二氮菲-Triton X-100	pH=1.9～4.7	532.2	2.2	(0～20)μg/25ml	1:3	172
	4-(2-噻唑偶氮)邻苯二酚-OP	pH=7～9.5	586	9.6	(0～18)μg/25ml	1:3	173
	3,5-二溴-PADAP-OP	(0.14～0.72)mol·L^{-1}盐酸	564	9.65	(0～8)μg/25ml	1:2	174
	BTAPC-TritonX-100	pH=8.5～10.5	630	12.0	(0～15)μg/25ml	1:3	175
	5-Br-PADAP-OP	pH=3～7	600	13.0	(0.004～0.48)×10^{-6}	—	176
	二溴苯基荧光酮-磺基水杨酸-Tween-60	pH=9～11	610	15.9	(0～10)μg/25ml	—	177
	硫氰酸盐-OP	(0.1～0.5)mol·L^{-1} HNO_3	490	1.56	(0～2.4)μg·ml^{-1}	—	178
	5-Br-PADAP-OP	pH4.5	746	—	(0～20)μg/25ml Fe	—	179
	5-Br-PADAP-OP-乙醇	pH=3.5～10	558	7.64	(0～60)μg/50ml Fe	—	180
	铬偶氮酚 KS-OP	pH=3.5～10	598	6.21	(0～20)μg/25ml Fe	—	181
	4,7-二苯基-1,10-菲罗啉-TritonX-100	pH3.8	532			—	182
	BPT-Tween-20	pH4.3	538	2.2	(0～10)μg/25ml		183
	均三溴偶氮胂-平平加	pH4.8	610	6.9	(0～14)μg/25ml	1:1	184
	向红菲罗啉-Tween-40	pH4.5	540	2.2	(0～100)μg/25ml	—	185
	4-(2-苯并噻唑偶氮)邻苯二酚(BTAPC)-OP	pH=4.6～6.8	620 630	10.2 11.6	(0～16)μg/25ml	1:2 1:3	186
	(6-Br-BTAPC)-OP	pH=8.5～9.4	635	12.3	(0～16)μg/25ml	1:3	187
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH5.5,析相	560		(0～14)μg/5ml	—	188
	2-(6'-溴苯并噻唑-2'-偶氮)-5-羧基苯酚-OP	pH8.8NaAc	603.8	6.3	(0～14.5)μg/25ml	—	189
	SCN-Tween-20	—	480	2.5	(0～25)μg/25ml Fe(Ⅲ)	—	190
	SCN-phen-Tween-80	0.15mol·L^{-1} H_2SO_4	520	1.91	(0～100)μg/25ml Fe(Ⅲ)	—	191
	SCN-Tween-80	pH2.0	486	2.3	(0～100)μg/25ml	—	192
	硫氰酸盐-Tween-40	pH=1.7～3.3	484	2.13	(0～200)μg/25ml	—	193
	向红菲罗啉-Tween-20	pH=1.9～7.99	538		(0～100)μg/25ml	—	194
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH4.0	558	7.2	(0～57.3)μmol·L^{-1}	—	195
	5-Br-PADAP-Tween-80	pH5.5	764	2.79	(0～35)μg/25ml	1:2	196
	PAN-OP	pH1.4	550	2.33	(0～70)μg/25ml	—	197
	DPPT-OP	pH=4～5	530	2.2	(0～80)μg/50ml	—	198
	SCN^--Tween-60	pH2.8	480	2.2	(0～60)μg/25ml	—	199
	PAN-TritonX-100	pH=3.0～9.0	740	1.6	(0～80)μg/25ml	—	200
	3,5-DiCl-PADAP	pH=3.5～6.0	570 755	8.4 3.9	(0～20)μg/10ml	1:2	201

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Ga	噁唑-Tween-80	弱碱性	575	7.9	(0~6)μg·ml^{-1}	1∶3	202
	苯并噻唑偶氮邻苯二酚-TX-100	pH=7.0~9.0	590	12.2	(0~15)μg/25ml Ga	1∶3	203
	对偶氮水杨酸苯基荧光酮(p-CHPA-PF)-Tween-80	pH=8.6~9.6	554	12.0	(0~10)μg/25ml	1∶4	204
Ge	水杨基荧光酮-OP	硫磷酸	505		(0~4)μg/25ml	1∶4	205
	苯基荧光酮-Tween-80	1.2mol·L^{-1}盐酸	508	14.3	(0~12)μg/50ml		206
	苯基荧光酮-OP	(0.08~2)mol·L^{-1}盐酸	505	13	(0~10)μg/25ml	1∶2	207
	结晶紫-锗钼杂多酸-OP	(0.11~0.14)mol·L^{-1}硫酸	545	15.0	(1.25~7.5)μg/25ml	—	208
	4,5-二溴-2,7-二羟基荧光黄-TritonX-100	5mol·L^{-1}HCl	512	17.0	(0~3)μg/10ml	1∶2	209
	邻氯苯基荧光酮-Tween-60	(1.0~3.5)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	514	18.1	(0~8.92)μg/25ml Ge	1∶4	210
	p-CHPA-PE-Tween-80	pH7.93	534	9.7	(0~13)μg/25ml	1∶1	211
	对氯苯基荧光酮-Tween-20	1.5mol·L^{-1} HCl	504~506	18.0	(0~10)μg/25ml	1∶4	212
	对氯苯基荧光酮-Tween-60	2.8mol·$L^{-1}H_2SO_4$		18.0	(0~3)μg/10ml	2∶4	213
	邻硝基苯基荧光酮-OP	0.06mol·$L^{-1}H_2SO_4$	492	15.0	(0~10)μg/25ml	1∶3∶1	214
	4,5-二溴水杨基荧光酮-Tween60	0.75mol·$L^{-1}H_2SO_4$	520	19.6	(0~3.5)μg/10ml	1∶4	215
	三溴氨基苯基荧光酮-Tween-20	(0.5~1.5)mol·L^{-1}HCl	520	16.4	(0~4)μg/25ml	1∶3	216
Hg	4,4'-二(二乙氨基)二苯硫酮-TritonX-100	pH=4.1~5.0	535	17.4	(0~0.48)μg·ml^{-1}	1∶4	217
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH=9.8~10.2	550	10	(0~35)μg/25ml	1∶2	218
	3,5-二氯-PADAP-OP	pH9.3	570	10.0	(0~25)μg/25ml	1∶2	219
	对偶氮苯重氮氨基偶氮苯磺酸-Triton X-100	pH9.3	528	17.6	(0.3~30)μg/25ml	1∶4	220
	邻甲氧基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH10	517	18.0	(0~11)μg/25ml	1∶3	221
	双硫腙-Tween-20	pH6	500	10.0	(0~35)μg/25ml		222
	PAN-TritonX-100	pH9	560		(0~60)μg/25ml	—	223
	邻硝基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH9.5	520	17.7	(0~25)μg/25ml	—	224
	二溴邻羧基苯基重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH10.5	517	20	(0~16)μg/25ml	1∶3	225
	硝基苯基苯并咪唑基三氮烯-Triton X-100	pH=8.85~9.15	520	26.0	(2~12)μg/25ml	—	226
	邻羧基苯基重氮氨基偶氮苯-Brij-35	pH9.5	520	18	(0~25)μg/25ml	—	227
	硫代米世酮-OP	pH3.8	530	13	(0~50)μg/50ml	1∶4	228
	4,4'-二偶氮苯重氮氨基偶氮苯-OP	pH10.0	515	16	(0~14)μg/25ml	—	229
	对甲醛基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH=9.01~9.97	510	11.6	(0.5~12)μg/25ml	1∶2	230
	对苯偶氮苯-三氮烯苯甲酸-OP	pH11.2	485	13.1	—	—	231
	桑色素-Brij-35	pH3.8	422	6.3	(0~30)μg/25ml	—	232
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB-Tween-80	pH6.0	574	24.4	(0~12.0)μg/25ml	—	233
Mn	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH=8.2~10.2	570	11.0	(0~40)μg/50ml	—	234
	3,5-二氯-DEPAP-OP	pH9.0	570	12.0	(0~10)μg/25ml	1∶3	235
	5-Br-PADAP-OP	pH=8~10.5	565	11.7	(0~20μg/25ml	—	236
	5-Br-PADN-Triton X-100	pH11.0	555	5.1	(0~38)μg/25ml	1∶2	237
	meso-四-(4-甲氧基苯基)卟啉-Tween-80	pH8.8	430	13.6	(0~3)μg/25ml	—	238
Mg	HCPCF-Tween-80	pH=12.3~13.0	660	5.4		1∶2	239
	三溴偶氮胂-平平加	pH10.4	620		(0~35)μg/25ml Mg	—	240

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Mg	3-羟基-4-(6-羟基间甲苯基)偶氮-1-萘磺酸-TritonX-100	pH12.2	517		(0~4.0)mmol·L^{-1} Mg	—	241
	Magon-Brij-35	pH=12~13	540		(0.25~2.55)mmol·L^{-1} Mg	—	242
	二甲苯胺蓝-TritonX-100	pH10	520		(0~4.10)mmol·L^{-1} Mg	—	243
	偶氮氯膦I-Tween-20	pH10.5	574	6.98	(0~12.5)μg/25ml		244
Mo	苯基荧光酮-TritonX-100	0.16mol·L^{-1}盐酸	520	11.5	(0~12)μg/25ml	1:1	245
	罗丹明B-SCN-聚乙烯醇		580	19.8	(0~12)μg/25ml	—	246
	BPR-聚乙烯吡咯烷酮	pH=3.6~4.3	600	7.4		—	247
	邻硝基苯基荧光酮-OP	(0.01~0.045)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	513	14.0	(0~20)μg/25ml	1:4:3	248
	氧化苏木色精-TritonX-100		550	9.2	(0~10)μg/10ml	—	249
	苯基荧光酮-TritonX-100	pH1.2	544		(0~25)μg/50ml Mo	—	250
	二溴羟基荧光酮(DBH-PF)-OP	(0.14~0.24)mol·$L^{-1}H_3PO_4$	530	11.0	(0~16)μg/25ml	1:2	251
	SCN-Tween-20	H_2SO_4	465	1.8	(0~100)μg/25ml	—	252
	SCN-Tween-80	(0.14~0.86)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	470	1.64	(0~60)μg/25ml	—	253
	SCN^--非离子表面活性剂					—	254
	3,4-二甲氧基苯基荧光酮-Tween-80	(0.18~0.32mol·L^{-1} HCl	526	11.6	(0~0.53)mg·ml^{-1}	1:1	255
Nb	5-Br-PADAP-OP	(0.08~0.2)mol·L^{-1}硫酸	617		(0~20)μg/25ml Nb_2O_5	—	256
	二溴苯基荧光酮-酒石酸-OP	pH4 0.5mol·L^{-1}盐酸	604 566	12 6.4	(0~6)μg/25ml (0~30)μg/25ml	1:3 1:2	257
	苯基荧光酮-TritonX-100	(0.12~0.24)mol·L^{-1}硫酸	525	10	(0~20)μg/50ml	1:3	258
	5-Br-PADAP-OP	(0.25~0.35)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	610	5.9	0.01%~0.10%	—	260
Ni	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH=8.5~11 pH5.5	555 665	11.8 11	(0~20)μg/50ml (0~15)μg/25ml	—	261 262
	达旦黄-Tween-80	pH=10.8~11.8	488	19	(0~10μg/50ml	1:3	263
	4,7-二苯基邻二氮菲-荧光桃红-OP	pH=6~10	566	4.7	(1~15)μg/25ml	—	264
	2-(2-苯并噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯甲酸-TritonX-100	pH6.0	648	13.5	(0~10)μg/25ml	1:2	265
	3,5-DiCl-DEPAP-OP	pH=6~9	565	11.0	(1~10)μg/25ml	1:3	266
	5-Br-PPFF-OP	pH=7.0~9.0	660~665	4.25	(0~22.5)μg/25ml	1:1	267
	PAN-OP		565	4.55	(0~25)μg/50ml	—	268
	镉试剂-Tween-80	pH=9.0~9.5	505	16.0	(0~0.3)μg·ml^{-1}	—	269
	Br-BTACP-OP	pH=7~8.03	593	10.5	(0~20)μg/10ml	1:3	270
	3,5-DiBr-PAMB-TritonX-100	pH=3.8~8.0	632	14.7	(0~0.4)μg·ml^{-1}	1:2	271
	DMTAE-OP	pH=8~10	555	12.5	(0~8)μg/25ml	1:2	272
	6-Br-BTAQS-Tween-80	pH=3.5~4.6	585	11.0	(0~10)μg/25ml	1:2	273
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH=5.3~7.2	565	10.8	(0~8)μg/5.5ml Ni	—	274
	5-Br-PADAP-OP	pH4.5	584		(0~20)μg/25ml Ni	—	275
	BTAMB-NaCl-TritonX-100	pH=5.5~7.75	648	13.6	(0~10)μg/25ml Ni	1:1	276
	5-DEPAQ-Tween-80	pH8.4	533	11.9	(0~0.5)μg/25ml Ni	1:4	277
	1-8(-羟基喹啉-7-偶氮)-苯-3-磺酸-TritonX-100-CTMAB	pH=3.7~5.3	500	11	(0~12)μg/25ml Ni	—	278
	(5-Br-PTPE)-TritonX-100	pH9.4	655		(0~10)μg/25ml Ni	1:2	279
	2-[2-苯并噻唑偶氮]-5-二甲氨基苯甲酸(BTAMB)-Triton X-100	pH=5.6~6.6	647	14.0	(0~12)μg/25ml	—	280
	6-Br-BTAMB-TritonX-100	pH=6.0~7.3	654	16.0	(0~10)μg/25ml	—	280
	5-Br-BTAMB-TritonX-100	pH=5.5~8.5	655	14.7	(0~10)μg/25ml	1:3	281
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH4.7	560		(0~20)μg/50ml	1:2	282

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Ni	苯重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH10.0	535	19.5	(0~8)μg/25ml	1:3	283
	4,4-二偶氮苯重氮氨基偶氮苯(BBDAB)-Triton X-100	pH10.0	540	20.0		1:4	284
	4-(邻重氮氨基苯胂酸)偶氮苯-OF-10	pH10.20	540	20.1	(0~7)μg/25ml	1:1	285
	对乙酰基苯重氮氨基偶氮苯-Triton X-100	pH10.20	498	16.0	(0~14)μg/25ml	—	286
	7-(1,2-苯并噻唑偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸(BTAQS)-Tween-80	pH=3.6~4.7	580	8.8	(0~9)μg/25ml	—	287
	1-(8-羟基喹啉-7-偶氮)-对硝基苯-Tween-80	pH=4.4~5	550	11	(0~7.5)μg/25ml	—	288
	8-羟基喹啉偶氮-二甲基联苯-Tween-80	pH8.0	545	12.9	(0~8)μg/10ml	1:2	289
	二氯-氨磺酰基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH10.3	540	20.5	(0~6)μg/25ml	1:2	290
	二溴-4-氨磺酰基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH10.3	535	15.9	(0~6)μg/25ml	1:2	291
	邻甲氧基苯基重氮氨基偶氮苯-OP	pH10.5	538	17	(0~4)μg/25ml	—	292
	5-Br-PNPFF(甲醛类)-Tween-80	pH5.0	710	4.89	(0~300)μg·L^{-1}	1:2	293
	溴吡啶二甲氨基苯胺-TritonX-100	pH4.5	565	16.1	(0~13)μg/25ml	1:2	294
	TAEB-Tween-80	弱酸性	614	14.3	(0~6.0)μg/10ml	1:1	295
	胂酸基甲基苯基重氮氨基偶氮苯-OP	pH11.2	538	19.2	(0~0.32)μg/ml	1:2	296
	二溴-PAC-TritonX-100	pH=0.65~1.0 H_2SO_4	565	16.5	(0~10)μg/25ml	—	297
	对偶氮苯重氮氨基偶氮苯磺酸-TritonX-100	pH10.0	546	23	(0~12)μg/25ml	1:4	298
Os	二苯碳酰二肼-OP-10	pH=2~5	560~580	35.0	(0.10~5.0)μg/10ml Os	1:1	299
P	罗丹明B-磷钼锗蓝-Tween-80	0.014mol·L^{-1}硫酸	592	4.8	(0~10)μg/25ml	—	300
	结晶紫-磷钼杂多酸-OP	0.14mol·L^{-1}硫酸	545	15.7	(0~8.0)μg/25ml	—	301
	孔雀绿-磷钼杂多酸-OP	0.21mol·L^{-1}硫酸	600	11.9	(0~7.0)μg/25ml	—	302
	$(NH_4)_3PMo_{12}O_{40}$-TrionX-100	……	325或340	—	(1~9)mg·dl^{-1}P	—	303
	孔雀绿-PMo杂多酸-OP或TritonX-100	酸性介质	600	11.9	(0~3.6)mol/L P	—	304,305
	罗丹明6G-磷钒钼蓝-AED-9	(0.81~0.87)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	562	34.1	(0~12)μg/25ml P	3:1	306
	结晶紫-磷钼酸-聚乙烯吡咯烷酮	0.5mol·L^{-1} H_2SO_4	555	17.0	(0~4.0)mmol/L P	—	307
	磷钼酸铵-孔雀绿-Triton X-100	(0.20~0.35)mol·L^{-1} H_2SO_4	590	36.0	(0~5)μg/50ml	—	308
	锑磷钼蓝-丁基罗丹明B-OP	0.32mol·L^{-1} H_2SO_4	586	35.0	(0~2)μg/25ml	—	309
	磷钼杂多酸-孔雀绿-TritonX-100	0.48mol·L^{-1} H_2SO_4	630	9.03	(0~2.0)μg/25ml	—	310
	磷钼杂多酸-孔雀绿-聚乙二醇辛基苯基醚		632		(0~5)μg/25ml	—	311
Pb	PAN-Tween-20	pH9.5以上	560	1.4	(0~100)μg/50ml	—	312
	5-Br-PADAP-OP	pH=7.5~9.8	570		(0~40)μg/25ml	1:2	313
	4,4-二(二甲氨基)硫代二苯甲酮-Tween-80	pH=4~5	524	20.0	(0~12)μg/ml	1:6	314
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH=2.0~2.7	536	17.5	(0~10)μg/25ml	1:1	315
	四(3,5-二溴-4-羟基苯)卟啉-OP-8-羟基喹啉	(0.04~0.16)mol·L^{-1}NaOH	479	24.0	(0~11)μg/25ml Pb	1:2	316
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH9.0	570	4.37	(0~10)μg/25ml	…	317

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Pb	*meso*-四(3,5-二溴-羟基苯)卟啉		475	20.1	(0~20)μg/25ml	2:1	318
	二溴吡啶偶氮二乙氨基苯酚-OP	pH10.75	580	6.84	(0~14)μg/25ml	1:2	319
	1-[5-溴-2-吡啶偶氮]-2,7-萘二酚-Tween-80	pH=3.0~6.0	590	8.31	(0~20)μg/25ml	—	320
Pd	湖蓝 6B-Tween-20	pH=6~7	662	12.1	(0~30)μg/25ml	1:1	321
	5-Br-PADAP-OP	(0.1~1.0)mol·L^{-1}硫酸	590	—	(0~2.1)μg·ml^{-1}	1:1	322
	镉试剂 A-Tween-80	pH=9~10	510	9.5	(0~20)μg/50ml	1:2	323
	硫代米蚩酮-Tween-80	pH=4~6	524	20	(0~20)μg/50ml	1:6	324
	硫代米蚩酮-TritonX-100	pH=2.5~4.2	530	16.8	(0~12)μg/50ml	1:4	325
	4,4'-二(二乙氨基)苯硫酮-TritonX-100	pH=3.5~4.5	530	21	$(0.04\sim0.52)\times10^{-6}$	1:6	326
	KI-罗丹明 6G-聚乙烯醇	1mol·L^{-1}硫酸	560	45	(0~8)μg·ml^{-1}	1:4	327
	DBSDAA-Triton X-100	pH10.0	530	11.5	(0~12)μg/25ml	1:2	328
	phen-镉试剂 A-平平加	pH=8.2~10.5	490	8.01	(0~20)μg/25ml		329
	phen-(OC-cadion)-Tween-80	pH10.0	520	10.0	(0~12)μg/25ml	1:1:2	330
	5-(4-硝基苯偶氮)-8-(苯磺酰氨基)喹啉(NPBSQ)-Tween-80	pH12.2	640	65.0	(0~10)μg/10ml	2:1	331
	甲基苯并噻唑偶氮二氨基吡啶-Brij35	pH=9.0~10.5	510	3.01	(0~14)μg/25ml	1:2	332
	米氏硫酮-TritonX-405	pH3.9	530	21	(0~10)μg/25ml	—	333
	对偶氮苯重氮氨基偶氮苯磺酸-Tween-80	pH11.0	533	10	(0~30)μg/25ml	—	334
	硝基苯偶氮氨基喹啉-Tween-80	pH10.6	660	4.5	(0~35)μg/25ml	—	335
Pt	5-(*p*-硝基苯偶氮)-8-(*p*-甲苯磺酰氨基)喹啉(NPTSQ)-Tween-80	pH>12	640	13.7	(0~25)μg/25ml	1:2	336
	DBS-偶氮氯膦-Tween-80	pH=1.3~2.0	630	6.47	(0~14)μg/25ml	2:3	337
	丁基罗丹明-KI-TritonX-100-阿拉伯胶	pH=1.5~2.0	620	100.0	(10~120)ng·ml^{-1}	—	338
	BDPTK-抗坏血酸-TritonX-100	pH=3.0~3.6	520	13.0	(0~1.4)μg·ml^{-1}	1:4	339
	硫代米蚩酮-OP	pH2.2	525	16.9	(0~14)μg/25ml	—	340
RE	CAS-phen-脂肪醇聚氧乙烯醚	pH=7.5~9.2	636.5	18.7	(0~13)μg/25ml Y_2O_3	—	341
	偶氮硝羟-聚乙烯醇	pH=2.0~3.5	730	51.8	(0~2.0)μg/10ml La_2O_3	—	342
Rh	丁基罗丹明 B-KI-TritonX-100-阿拉伯胶	pH=1.5~2.0	590	180.0	(4~70)ng·ml^{-1}	1	343
Sb	KI-水杨基荧光酮-OP	(0.25~0.38)mol·L^{-1}盐酸	510	7.1	(0~15)μg/10ml	—	344
	KI-5-Br-PADAP-OP	0.1mol·L^{-1}硫酸	615	4.6	(0~16)μg/10ml	—	345
	5-Br-PADAP-OP	(0.01~0.075)mol·L^{-1}硫酸	610	4.3	(0~40)μg/25ml	—	346
	4,5-二溴苯基荧光酮-KI-乙醇-OP	0.2mol·L^{-1}HCl	515	11.0	(0~10)μg/25ml	—	347
	邻硝基苯基荧光酮-乳化剂 OP	(0.14~0.28)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	515	6.67	(0~5)μg/25ml	—	348
	3,5-DiBr-PADAP-OP	(0.15~0.3)mol·L^{-1}HCl	640	5.6	(0~14)μg/10ml	—	349
	水杨基荧光酮-OP	0.12mol·$L^{-1}H_2SO_4$	504~508		(0~12)μg/25ml	—	350
Sc	CAS-TritonX-100	pH=6.5~7.5	590	21.6	(0~5)μg/25ml	1:2	351
	5-Br-PADAP-Triton X-100	pH6.5	584	5.9	(0~11)μg/10ml		352
Se	丁基罗丹明 B-SCN^--Tween-20	pH4.0	600	64	(0~5)μg/25ml Se	—	353
	SCN^--丁基罗丹明 B-Tween-40	pH4	606	31.6	(0~6)μg/25ml	—	354

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Si	罗丹明6G-硅锑钼蓝-OP	2.6mol·L^{-1} H_2SO_4	542	20.1	(0~10)μg/25ml	—	355
Sn	苯基荧光酮-OP	(0.2~0.5)mol·L^{-1}硫酸	460~470		(0~15)μg/25ml	—	356
	苯基荧光酮-Tween-80	(0.25~1.05)mol·L^{-1}硫酸	515	11.9	(0~20)μg/50ml	—	357
	二溴苯基荧光酮-OP	pH=1.5~2.5	536	14.6	(0~20)μg/25ml	1:2	358
	苯基荧光酮-TritonX-100	(0.25~0.75)mol·L^{-1}硫酸		12.5	(0~16)μg/25ml	—	359
	苯基荧光酮-TritonX-100	稀H_2SO_4	504	14.2	—	—	360
	邻氯苯基荧光酮-Tween-20	0.4mol·L^{-1} H_2SO_4	510	17.8	(1~20)μg/25ml Sn	1:4	361
	邻氯苯基荧光酮-Tween-60	(0.47~1.55)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	514	15.1	(1~11)μg/25ml Sn		362
	水杨基荧光酮-OP	稀HNO_3	505	15.0	(0.5~20)μg/50ml Sn	—	363
	苯基荧光酮-OP	3.6mol·L^{-1} H_2SO_4	505		(0~10)μg/50ml		364
	4,5-二溴苯基荧光酮-Tween-80	pH2.7	540	14.5	(0~35)μg/50ml	1:2	365
	二溴羟基苯基荧光酮-OP	(0.1~0.3)mol·L^{-1}HCl	520	13	(0~11)μg/25ml	—	366
Sr	偶氮氯膦Ⅲ-Tween-80	pH=3~5	666	4.05	—	1:2	367
Ta	5-Br-PADAP-OP	(1.0~1.4)mol·L^{-1}硫酸	509	10.3	(0~12)μg/25ml Ta_2O_5	—	368
	对硝基苯荧光酮-TritonX-100	(0.36~0.78)mol·L^{-1}硫酸	522	16.5	(0~10)μg/25ml	—	369
	4,5-二溴苯基荧光酮-柠檬酸-TritonX-100	(0.5~5.0)mol·L^{-1} H_2SO_4	530	17.0	(0~10)μg/25ml	1:2:1	370
Th	三溴偶氮氯膦-OP	3.2mol·L^{-1}HCl	646	11.5	(0~11)μg/25ml Th	1:2	371
	二溴偶氮氯膦-OP	3.2mol·L^{-1}HCl	644	11.7	(0~12)μg/25ml Th	—	372
	5-Br-PADAP-OP	pH=2.3~2.85	530	12.2	(0~20)μg/25ml	—	373
	邻氯苯基荧光酮-TritonX-100	pH4.3	530	13.3	(5~18)μg/25ml	1:4	374
Ti	苯基荧光酮-OP	pH=0.7~2	540~545	10	(0~6)μg/25ml	—	375
		pH=0.9~1.5	540	12.7	(1~8)μg/20ml	—	376
	邻硝基苯基荧光酮-TritonX-100	—	541	20	(0~4)μg/25ml	1:4	377
	水杨基荧光酮-TritonX-100	(0.015~0.055)mol·L^{-1}硫酸	534	20.4	(0~8)μg/250ml	1:4	378
	BPHA-TritonX-100	(1~4)mol·L^{-1}硫酸	360	6.47	(0~3)mg·L^{-1}	—	379
	N-肉桂酸-*N*-邻甲基羟胺-TritonX-100	(1~4)mol·L^{-1}硫酸	360	1.68	(0~1)mg·L^{-1}	—	379
	F-百里香酚酞-TritonX-100	(0.2~0.05)mol·L^{-1}盐酸	360	1.2	(0~36)μg/10ml	1:1:2	380
	抗坏血酸-苯羟乙酸-喹唑-Tween-80	pH=5.5~6.5	535	11	(0~8)μg/25ml	1:2:2	381
	喹唑对氯苦杏仁酸-OP	pH=5.5~6.5	526	10.5	(0~6.5)μg/25ml	1:2:2	382
	邻氯基苯基荧光酮-Tween-80	0.175mol·L^{-1} H_2SO_4	538	15.8	(0~10)μg/50ml	—	383
	4,5-二溴苯基荧光酮-Tween-80	(0.08~0.14)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	550	10.2	—	—	384
	邻硝基苯基荧光酮-TritonX-100	(0.004~0.092)mol·L^{-1}HCl	540	20.8	(0~4)μg/25ml	1:3	385
	苯基荧光酮-TritonX-100	pH1.2	560		(0~10)μg/50ml Ti	—	386
	二溴羟基苯基荧光酮-TritonX-100	0.05mol·L^{-1} H_2SO_4	544	17.5	(0~5)μg/25ml Ti	1:3	387
	5-溴-水杨基荧光酮-Tween-20	0.12mol·$L^{-1}H_2SO_4$	534	22.3	(0~4.0)μg/25ml Ti	—	388
	苯基荧光酮-TritonX-100		530	14.2	(0~3)μg/50ml	—	389
	对氯苯基荧光酮-TritonX-100	(0.04~0.15)mol·L^{-1} HCl	537	21.8	(0~6)μg/25ml	—	390
	邻氯基苯基荧光酮-Tween-20	稀HNO_3-H_2SO_4	540	19.6	(0~4)μg/25ml	1:4	391

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Ti	偶氮氯膦 mA-$NH_2OH \cdot HCl$-OP-Tween-80	pH4.95	691	25.0	(0~4)μg/25ml		392
	H_2O_2-5-Br-PADAP-OP，同时测 Fe	pH4.0	540 604		(0~15)μg/25ml	1:2:1	393
	二溴茜素紫-Tween-80	pH2.1	640	4.4	(2~11)μg/25ml	1:2	394
	间溴苯基荧光酮-Tween-80	(0.1~0.2)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	538	20	(0~2.8)μg/10ml Ti	1:4	395
	邻硝基苯基荧光酮-OP	pH1.2	520	11.3	(2~20)μg/50ml Ti		396
Ti(Ⅱ)	4-4'-二偶氮苯重氮氨基苯-TritonX-100	pH=9.9~11.3	517	16	(0~1.2)μg/ml Ti	1:5	397
Tl	5-Br-PADAP-OP	pH=1~1.4	640	13	(0~30)μg/50ml	—	398
	2,6-二氯-4-氨磺酰基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH10.3	515	13.2	(0~18)μg/25ml	1:4	399
	2,4-二溴-6-羧基苯重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH10.5	520	18.3	(0~0.64)μg/ml	..	400
	对偶氮苯重氮氨基偶氮苯磺酸-TritonX-100	pH10.6	522	13	(0~35)μg/25ml	—	401
U	5-Br-PADAP-OP	pH=8.5~10.1	578	6.2	(0~3.2)μg·ml^{-1}	—	402
	二溴苯基荧光酮-Tween-60	pH=6.5~9.0	565	179	(0~5.1)μg/10ml	1:3	403
	5-Br-PADAP-磺基水杨酸 TritonX-100	pH=7.8~8.0	581	6.4	—	1:2:6	404
	偶氮氯膦Ⅲ-OP	1mol·L^{-1} HCl	690				405
	Br-PADAP-磺基水杨酸-OP（或 Triton X-100）	H_3BO_3-HCl 介质			(0~25)μg/25ml		406
	双噻唑基双偶氮双萘酚-TritonX-100	pH5	580		—	—	407
	邻氯苯基荧光酮-Tween-80	pH8.0	560	14.8	(0~1.2)μg·ml^{-1}	—	408
V	HCPCF-Tween-80	pH=3.5~6.0	650	10.3	(0~3×10^{-5})mol·L^{-1}	1:2	409
	锌试剂-Triton X-100	pH=4.1~5.2	690	1.1	(0~100)μg/25ml	—	410
	5-Br-PADAP-TritonX-100	0.36mol·L^{-1} 硫酸	590	5.5	(0~10)μg/25ml	—	411
	3,5-DiBr-PADAP-TritonX-100	(2.0~1.0)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	609	6.7	(0~24)μg/25ml	—	412
	二安替吡啉苯乙烯基甲烷-Tween-40	H_3PO_4 介质	550	20.0	(0~7)μg/25ml	—	413
	邻-硝基苯基荧光酮-Tween-80	pH=2.5~5	510	6.08	(0~20)μg/25mlV	1:3	414
	5-Br-PADAP-OP	pH1.2	595	6.6	(0~18)μg/25mlV	-	415
	Br-PADAP-TritonX-100	pH3.6	589	5.1	(0~25)μg/25ml V	—	416
	二安替比林苯基甲烷(DAPM)-Tween-40	H_3PO_4 介质 Mn^{2+} 存在	480	132.0	(0.2~1.2)μg·ml^{-1}	—	417
	二安替比林-邻氯苯基甲烷-Tween20	4%H_3PO_4	480	41.4	(0~2.5)μg/25ml	—	418
W	氯化苏木色精-TritonX-100	(0.048~0.144)mol·L^{-1}HCl	555	7.5	(0~20)μg/25ml	—	419
	4,5-二溴邻硝基苯基荧光酮-TritonX-100	(0.5~2.8)mol·L^{-1}HCl	534	9.2	(2~45)μg/25ml W	—	420
	对氯苯基荧光酮-Tween-60	(0.4~1.6)mol·L^{-1}HCl	532	24.2	(0~2.5)μg/10ml	1:2	421
Y	对硝基偶氮氯膦-PVA	0.8~1.35mol·L^{-1}HCl	730	7.4	(7~17)μg/25ml	1:3	422
	对甲基偶氮氯膦-TritonX-100	pH5.0	755	18.2	(6~12)μg/25ml	—	423
Zn	1-(2-吡啶基)-5-苯基-3-(2-呋喃基)甲臜 Tween-20	pH=8~12	610	4.9	(0~20)μg/50ml	1:2	424
	3,5-DiBr-DMPAP-Tween-80	pH=8.5~9.5	560	12.4	—	1:2	425
	镉试剂 2B-OP	pH=8.7~12.3	525	10.6	(0~15)μg/25ml	—	426
	3,5-DiBr-PADAP-OP	pH=7.0~10.0	570	13.0	(0~9)μg/10ml	—	428
	6-Br-BTAQS-Tween-80	pH=3.8~5.0	565	9.6	(0~12)μg/25ml	1:2	429
	3,5-DiCl-DEPAP-OP	pH=6~9	563	13.0	(1~10)μg/25ml	1:3	430
	5-Br-PNPFF-Tween-80	pH9.0	688	5.9	(0~4.2)μg/10ml	1:4	431
	2-(2-苯并噻唑偶氮)间二甲氨基酚-OP	pH=8.2~8.6	450	18.0	(0~1.2)μg/10ml	1:2	432
	3,5-DiCl-DPEAP-OP	pH6.5	565	13.0	(0~10)μg/25ml	1:2	433

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\epsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Zn	5-Br-PADAP-OP	pH9.0	552	13.0	(0～12)μg/25ml	1:2	434
	3,5-DiBr-DEPAP-OP	pH7.8	575	12.2	(0～9)μg/25ml Zn	1:3	435
	5-Br-PADAP-Triton100	pH8.5	560	14.7	(0～4)μg/5ml Zn	1:2	436 437
	5-Br-PADAP-OP	pH8.7	550	11.1	(0～10)μg/25ml Zn	—	438 439
	3,5-DiBr-PADAP-平平加	pH8.8	575	12.7	(0～9.0)μg/25ml Zn	—	440 441
	PAN-OP	pH9.2	555		(0～25)μg/25ml Zn	—	442 443
	5-Br-DMPAP-OP	pH=8.0～10.3	552	12.0	(0～22)μg/25ml Zn	1:2	444
	四(4-甲氧基-3-磺酸基苯)卟啉-咪唑-OP	pH9.5	434	30	(0～2)μg/10ml Zn	—	445
	锌试剂-Tween-80	pH9.3	635	2.4	(0～75)μg/25ml Zn	—	446
	Cadion 2B-TritonX-100	pH=8.5～9.8	524	10.0	(0～12)μg/25ml	—	447
	PAN-Tween-80	pH=9.2～10.4	555	8.37	(0～30)μg/100ml	—	448
	四(4-甲基-3-磺基苯)卟啉-Tween-60	pH4.4	428	52	(0～1.2)μg/10ml	—	449
	四(对羟基苯基)卟啉-Triton X-100	pH9.7		250	(0～2)μg/25ml	—	450
	四(对甲氧基苯)卟啉-Tween-80	pH7.05		49.5		—	451
	5-Br-PADAO-OP	pH8.5	555	12.0	(0～4)μg/50ml	—	452 453
	5-Br-PADAP-OP DMTAM-TritonX-100	pH9.5	540 580	 8.42	$(2\times10^{-3}$～4)μg·ml^{-1} (0～5)μg/25ml	—	454 455
	5-Br-PADAP-OP	pH8.5	554	12	(0～25)μg/50ml	—	456
	4,4'-二偶氮苯重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH11.0	525	16.3	(0～8)μg/25ml	1:2	457
	二溴邻羧基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100	pH10.5	530	19.4	(0～8)μg/25ml	—	458
	HQANB-Tween-80	pH6.8	550	12	(0～10)μg/25ml	1:2	459
	安替比林基对硝苯基三氮烯-TritonX-100	pH=10.5～11.5	538	8.4	(0～7)μg/25ml	1:3	460
	3,5-DiBr-PADAP-聚乙二醇壬基苯醚	pH10	570	13	(0～9)μg/10ml	—	461
	HQANS-OP	pH=5.5～7.0	510	5.78	(0～15)μg/25ml	1:3	462
	PAN-6S-TritonX-100	pH8.8	545	5.1	(4～40)μg/25ml	1:2	463
	PAN-Tween-80	pH8.45	550	5.0	—	1:2	464
	1-(对偶氮苯)-3-(2-噻唑)-三氮烯-TritonX-100	pH=3.0～14.0	545	9.6	(0～24)μg/25ml	1:3	465
Zr	丙二酸-溴邻苯三酚红-OP	pH=5.0～6.0	690	8.4	(0～60)μg/25ml ZrO_2	1:2:2	466
	二溴苯基荧光酮-OP	(0.7～2.2)mol·L^{-1}盐酸	545	18.5	(2～10)μg·ml^{-1}	1:4	467
	桑色素-Tween-80	(0.5～1.8)mol·L^{-1}盐酸	420	8.06	(0～6.4)μg/10ml	—	468
	桑色素-各种表面活性剂	—	—			—	469
	桑色素-OP	(0.1～0.8)mol·L^{-1} HCl	420	7.95	(0～0.73)μg·ml^{-1}	1:4	470
	5-Br-PADAP-TritonX-100	pH3.3	582	14.1	(0～21)μg/25ml Zr	—	471
	5-Br-PADAP-OP	pH4	584	12	(0～40)μg/25ml Zr	—	472
	茜素红 S-聚乙烯吡咯烷酮-聚乙二醇		525	5.9	(0～77)μg/25ml Zr	1:1	473
	香草基荧光酮-Tween-20	(0.24～0.36)mol·L^{-1} HCl	530	13.9	(0～12)μg/25ml	—	474
	邻硝基苯基荧光酮-Tween-80	(0.06～0.30)mol·L^{-1}HCl	544	17.8	(0～10)μg/25ml	—	475
	二溴羟基苯基荧光酮-Tween-80	0.44mol·L^{-1}HCl	536	16.0	(0～10)μg/25ml	1:4	427
	对乙酰基偶氮氯膦-TritonX-100	0.2mol·L^{-1}HCl	690	2.60	(0～25)μg/25ml	1:1	259

本表参考文献：

1 李玲颖等．化学试剂，1984；6(6)：357
2 王怀公等．分析化学，1983；11(7))，524
3 曹诗倜等．分析试验室，1985；4(11)：11
4 高薇薇．分析化学，1984；12(1)：61
5 詹才清．冶金分析．1986；6(3)：13
6 张有贤等．贵金属，1986；7(1)：29
7 薛　光．分析试验室，1986；5(10)：24
8 刘　忻．分析试验室，1986；5(5)：59
9 冯孝阳等．矿物岩石，1988；8(4)：118
10 孙国斌等．分析化学，1989；17(6)：564
11 陈婉如，蒋新芳，潘教麦等．理化检验(化)，1991；27(5)：267
12 薛　光．岩矿测试，1991；10(4)：310
13 朱有瑜，叶晓岚，陈海年．杭州大学学报(自)，1992；19(1)：71
14 许翠瑞，袁经伟．冶金分析．1982；2(3)：4
15 黄永修．冶金分析．1984；4(4)：60
16 徐盘明，祝纪庆．理化检验，1983；19(6)：37
17 黄永修．分析试验室，1984；3(5)：95
18 王怀公．理化检验，1983；19(4)：2
19 杨　元等．分析化学，1987；15(8)：683
20 杨　元，陈远慧．理化检验(化)，1988；24(5)：260
21 戚文彬，王耐冬等．杭州大学学报，1990；17(2)：189
22 陈宜群．工业水处理，1989；9(3)：32
23 吴心传等．湖南冶金，1991；(4)：39
24 郑用熙等．化学试剂，1983；5(2)：70
25 王德沐等．甘肃有色金属，1991；(2)：54
26 蠲念琴等．冶金分析，1986；6(3)：5
27 刘鹤仙等．山西大学学报，1986；(2)：67
28 唐章贤等．冶金分析，1989；9(1)：14
29 魏东霞．冶金分析，1982；2(4)：34
30 薛　光．分析化学，1986；14(9)：679
31 薛　光．分析化学，1988；16(1)：64
32 君哲俊．分析试验室，1987；6(1)：63
33 徐季明等．岩矿测试，1989；8(1)：62
34 尹尚群．分析试验室，1988；7(11)：64
35 龚治湘等．岩矿测试，1989；8(3)：176
36 丁耀伟．华东地质学院学报，1989；12(4)：87
37 薛　光，黄金，1990；11(8)：37
38 铁安年，邓月金．冶金分析，1991；11(2)：47
39 任　英，张晶玉，张佩勋．分析化学，1991；19(5)：588
40 任　英等．冶金分析，1992；12(5)：25
41 马学军．理化检验(化)，1994；30(2)：105
42 郭采文等．分析试验室，1983；4(3)：4
43 范蔚全等．理化检验(化)．1984；20(4)：27
44 张子贞等．分析化学，1982；10(11)：686
45 李金如等．冶金分析，1985；5(3)：1
46 周荣衣等．化学试剂，1989；11(4)：251
47 杨　元等．分析化学，1989；17(4)：365
48 陈国树等．江西大学学报(自)，1989；13(4)：17
49 刘万昌等．冶金分析，1986；6(2)：19
50 孙慧珠等．分析化学，1983；11(10)：767
51 孔聘颜等．分析测试通报，1984；3(3)：34
52 左士瑜等．冶金分析，1988；8(1)：18
53 何鼎峰等．冶金分析，1987；7(3)：16
54 徐其林．冶金分析．1989；9(6)：57
55 张　光等．冶金分析，1989；9(2)：43
56 赵建华等．冶金分析，1989；9(3)：37
57 袁孝良等．分析化学，1991；19(2)：171
58 冯亚平等．理化检验(化)，1984；20(2)：封2
59 孙嘉彦等．干旱环境监测，1990；4(2)：76
60 陈玉英等．分析测试通报，1993；12(1)：71
61 吴　诚等．理化检验(化)，1983；19(1)：2
62 高家隆等．兰州大学学报(自)，1983；(4)：102
63 徐其亨等．分析试验室，1983；2(2)：23
64 杨桂法等．分析测试通报，1983；2(3)：25
65 卫其生．理化检验(化)．1986；22(1)：37
66 周发连等．岩矿测试，1988；7(2)：86
67 杨桂法等．分析化学，1987；15(10)：915
68 刘　瑜等．武汉大学学报(自)，1990；(2)：120
69 王敏芳等．理化检验(化)，1990；26(4)：200
70 武国华，贺光栅．安徽大学学报(自)，1991；(4)：77
71 刘彬，孙家娟等．理化检验(化)，1990；26(5)：265
72 苏剑雄，陈安子．华侨大学学报(自)，1990；11(4)：366
73 王　磊等．岩矿测试，1990；9(4)：261
74 曲祥金．环境科学与技术，1991；(1)：25
75 朱玉瑞，江万权，滕恩江．中国科学技术大学学报，1991；21(1)：17
76 徐　斌，龚楚儒等．分析化学，1991；19(10)：1179
77 孙培培，王　磊等．分析试验室，1991；10(6)：15
78 倪其道，吴庆生．分析化学，1990；18(11)：1067
79 张路端等．陕西师大学报(自)，1992；20(1)：51
80 吴太白．冶金分析，1990；10(2)：54
81 张　光等．陕西师范大学学报．1989；17(1)：37
82 赛　音，清格勒图．分析化学，1989；17(3)：260
83 丘星初，邬建平等．中国环境监测．1988；4(5)：9
84 何孟生，左　亮．环境与健康杂志，1989；6(4)：16
85 尹　权，张华山，王志良．化学试剂，1989；11(3)：137
86 徐钟隽，王　巍等．理化检验(化)，1989；25(2)：76
87 朱玉瑞等．中国科技大学学报，1989；19(1)：123
88 邢俊良等．解放军预防医学杂志，1989；7(2)：152
89 魏复盛，江万权等．干旱环境监测，1990；4(1)：1
90 刘　瑜等．痕量分析，1988；4(3)：15
91 金　谷，朱玉瑞等．分析化学，1989；17(10)：875
92 王　磊等．分析化学，1992；20(6)：648
93 翟广进等．理化检验(化)．1992；28(3)：161
94 王莽鹏等．地质实验室，1993；9(4)：200
95 孙培培等．化学试剂，1993；15(5)：302
96 徐　斌等．分析测试学报，1993；12(6)：15
97 王永丰．光谱实验室，1994；11(2)：10
98 孙培培等．分析化学，1994；22(5)：436
99 陈展光等．分析测试学报，1995；14(2)：23
100 王献科．冶金分析，4(2)：20
101 冯建章．北京大学学报(自)，1984；(2)：41
102 孙　沂等．冶金分析，1987；7(11)：27
103 沈含熙等．化学学报，1988；46(3)：285
104 沈含熙等．分析化学，1988；16(4)：301
105 张英明等．理化检验(化)，1989；25(4)：219
106 张正奇，丁义平．岩矿测试，1990；9(3)：169
107 王玉枝，薛兰生，杨桂法．痕量分析．1991；7(1)：61
108 罗宗铭等．广东工学院学报(自)，1990；7(4)：31
109 蔡耀中，龚　育等．化学试剂，1991；13(3)：176
110 赵建为，曾佐涛，徐其亨．理化检验(化)，1991；27(2)：112
111 桂素萍，赵建为，徐其亨．云南化工，1991；(4)：32
112 张　光，杨合情．分析试验室，1991；10(3)：1
113 张　光，杨合情．分析化学，1991；19(5)：542
114 孙培培等．理化检验(化)，1992；28(3)：150
115 杨世万等．理化检验(化)，1993；29(1)：11
116 李继和．甘肃有色金属，1993；(1)：41

117 徐其亨等. 化学学报. 1984; 42(2): 151
118 郑礼胜等. 分析试验室, 1986; 5(10): 29
119 贝自英, 严隽梓等. 理化检验(化), 1990; 26(6): 357
120 陈建华, 蔡锦国等. 化学试剂, 1990; 12(1): 54
121 张龙军, 王鹏举等. 分析化学, 1990; 18(10): 893
122 徐幼虹, 杨晓云等. 干旱环境监测, 1992; 6(1): 1
123 胡 浩. 理化检验(化), 1992; 28(2): 92
124 孙嘉彦, 陆 平等. 干旱环境监测, 1991; 5(1): 31
125 杨 元, 陈远慧. 分析化学, 1991; 19(1): 92
126 陆 侠等. 理化检验(化), 1993; 29(4)): 210
127 高若梅等. 地质实验室, 1994; 10(1): 9
128 杨 元等. 分析化学, 1986; 14(4): 269
129 龚国权等. 分析试验室, 1984; 3(2): 57
130 诸杏君等. 理化检验(化), 22(2): 86
131 袁有宪. 分析化学, 1985; 13(3): 220
132 王怀公等. 兰州大学学报(自), 1982; (2): 116
133 徐其亨等. 分析试验室, 1985; 4(11): 18
134 张 光等. 分析化学, 1987; 15(11): 1004
135 周宇侯等. 理化检验(化), 1988; 24(1): 5
136 赛 音等. 分析试验室, 1988; 7(4): 34
137 尹哲俊. 分析试验室, 1986; 5(4): 59
138 孙 沂等. 理化检验(化), 1987; 23(4): 221
139 杨 文等. 分析试验室, 1986; 5(10): 38
140 周发连, 张纪文. 分析试验室, 1990; 9(1): 71
141 周发连, 谢春伟. 理化检验(化). 1989; 25(2): 68
142 周发连, 周红晖. 岩矿测试, 1989; 8(3): 191
143 赵文焕等. 河南大学学报(自), 1988; (4): 76
144 曾文青. 中华医学检验杂志, 1991; 14(1): 26
145 薛 光. 上海环境科学. 1991; 10(5): 32
146 江淑美. 分析化学, 1991; 19(1): 77
147 曹 伟, 张利君. 冶金分析, 1992; 12(2): 40
148 杨 威, 滕文娟, 李晓明. 辽宁大学学报(自), 1991; 18(2): 12
149 林辉概等. 理化检验(化), 1991; 27(2): 82
150 周宗侯等. 广东工学院学报(自), 1992; 9(1): 9
151 徐茂军, 马卫兴, 孙正利. 食品科学, 1992; (2): 53
152 尹郁芝, 赣国钧, 黄益人. 湖南大学学报(自), 1992; 19(1): 99
153 赵建为, 桂素萍等. 干旱环境监测, 1991; 5(3): 164
154 王东进, 孙德仁等. 分析化学, 1991; 19(9): 1036
155 徐其亨, 张 梅等. 干旱环境监测. 1990; 4(4): 187
156 黄泽兴等. 化学试剂. 1992; 14(3): 132
157 朱有瑜等. 化学试剂, 1992; 14(2): 73
158 宁明远. 邵阳师专学报(自), 1993; 13(1): 36
159 潘富友等. 化学试剂, 1993; 15(2): 119
160 朱飞瑞等. 中国科学技术大学学报, 1993; 23(4): 493
161 金 伟. 冶金分析, 1993; 13(4): 61
162 邱漫铨等. 化学世界, 1993; 34(12): 607
163 朱震石等. 分析化学, 1993; 21(11): 1276
164 宁明远. 理化检验(化), 1994; 30(1): 45
165 张贵珠等. 冶金分析, 1994; 14(1): 14
166 杨世万等. 理化检验(化), 1994; 30(3): 176
167 马东兰等. 冶金分析, 1994; 14(5): 23
168 杜 斌等. 分析化学, 1994; 22(12): 1286
169 张明时等. 冶金分析, 1984; 4(4): 32
170 冯建章等. 环境化学. 1983; 2(1): 68
171 冯建章等. 理化检验(化), 1981; 20(1): 35
172 袁有宪. 分析化学, 1985; 13(1): 47
173 冯建章等. 分析化学, 1985; 13(8): 585
174 陈惠凤等. 分析测试通报, 1985; 4(1): 1
175 冯建章等. 高等学校化学学报, 1988; 9(4): 407
176 吴新民. 理化检验(化), 1987; 23(2): 95
177 赵中一等. 化学试剂, 1988; 10(2): 87
178 罗观平. 分析试验室, 1987; 6(2): 66
179 陈亚华, 时云辉. 冶金分析, 1989; 9(4): 27
180 晋 勇. 冶金分析, 1988; 8(5): 56
181 晋 勇. 分析试验室, 1989; 8(1): 63
182 王世孟, 王长松. 分析化学, 1988; 16(12): 1129
183 魏 琴等. 食品与发酵工业, 1990; (6): 69
184 孙嘉彦, 陈晓年等. 冶金分析, 1991; 11(2): 12
185 魏 琴, 杜 斌等. 岩矿测试, 1991; 10(3): 236
186 姚 成, 王镇浦. 分析化学, 1990; 18(12): 1087
187 姚 成, 王镇浦, 赵庆波. 化学试剂, 1991; 13(6): 326
188 周发连等. 华东地质学院学报, 1991; 14(2): 189
189 孙天祥, 韩玉英, 王俊香. 山西大学学报(自). 1990; 13(3): 292
190 李世卿. 中国环境监测, 1989; 5(4): 63
191 高明雄等. 广西化工, 1989; (1): 32
192 魏 琴, 杜 斌等. 冶金分析, 1991; 11(6): 50
193 杜 斌等. 矿物岩石, 1992; 12(2): 99
194 魏 琴等. 理化检验(化), 1992; 28(3): 163
195 曹建明等. 中华医学检验杂志, 1992; 15(5): 268
196 聂长明等. 吉林化工学院学报(自), 1993; 10(1): 27
197 赵书林等. 地质实验室, 1993; 9(2): 89
198 肖志德等. 理化检验(化), 1994; 30(2): 113
199 魏 琴等. 地质实验室, 1994; 10(6): 344
200 魏 琴等. 山东冶金, 1994; 16(3): 11
201 钱德慧等. 化学试剂, 1994; 16(6): 327
202 陈玉缓等. 福州大学学报, 1981; 4(4): 1
203 冯建章等. 北京大学学报(自), 1988; 24(6): 695
204 王 鹏等. 岩矿测试. 1990; 9(4): 265
205 刘万昌等. 冶金分析. 1984; 4(4): 1
206 张 力等. 冶金分析. 1984; 4(6): 42
207 赵国栋等. 分析试验室. 1985; 4(2): 57
208 王镇棣等. 化学通报, 1983; (7): 19
209 潘庆洪等. 分析化学, 1987; 15(4): 313
210 胡 勇. 贵州大学学报(自), 1989; 6(1): 58
211 王 鹏等. 分析化学, 1991; 19(5): 577
212 徐勉懿等. 化学试剂, 1992; 14(1): 46
213 庄锦英等. 理化检验(化). 1990; 26(4): 221
214 郭志英. 分析试验室, 1987; 6(3): 31
215 王东进等. 地质实验室, 1993; 9(6): 327
216 王莉鹏等. 地质实验室, 1994; 10(2): 72
217 刘兆兰等. 化学试剂, 1986; 8(2): 67
218 杨喜田等. 冶金分析, 1983; 3(1): 23
219 张 光等. 分析化学, 1987; 15(10): 912
220 魏复盛等. 环境科学研究, 1990; 3(4): 7
221 陈婉如等. 化学试剂, 1990; 12(4): 215
222 宋纪蓉. 理化检验(化), 1997; 27(5): 308
223 李德亮等. 化工环保, 1992; 12(3): 181
224 朱有瑜等. 化学试剂, 1992; 14(5): 283
225 王 磊等. 地质实验室, 1993; 9(1): 11
226 曹诗倜等. 矿冶工程, 1993; 13(2): 65
227 于 村. 杭州食品科技, 1993; (4): 46
228 郑礼胜等. 工业水处理, 1994; 14(3): 27
229 张文德等. 冶金分析, 1994; 14(5): 11
230 郑建华等. 理化检验(化), 1995; 31(1): 29
231 汤国平等. 分析科学学报. 1995; 11(2): 21
232 赵锦瑞等. 地质实验室. 1993; 9(6): 321
233 王玉兴等. 分析化学, 1994; 22(6): 623
234 朱晓华等. 理化检验(化), 1983; 19(5): 45
235 张 光等. 分析化学. 1987; 15(2): 142

236 陈朝阳．理化检验(化)，1987；23(1)：26
237 林延平等．湖南大学学报，1990；17(4)：63
238 霍广进等．理化检验(化)，1993；29(6)：334
239 冯亚平等．理化检验(化)，1984；20(2)：封2
240 孙嘉彦等．干旱环境监测，1990；4(2)：76
241 陈冠北等．中华医学检验杂志，1990；13(1)：6
242 李树中等．上海医学检验杂志，1989；4(1)：38
243 宋克征等．临床检验杂志，1989；7(2)：75
244 孙威锐等．理化检验(化)，1992；28(4)：245
245 铁安年等．分析化学，1983；11(11)：839
246 龚国权等．分析化学，1985；13(6)：411
247 王怀公等．兰州大学学报(自)，1982；(1)：120
248 郭志英．分析试验室，1987；6(8)：31
249 张在蓥等．冶金分析，1988；8(1)：11
250 赵书林等．冶金分析，1989；9(1)：8
251 潘教麦，田　文等．理化检验(化)，1991；27(2)：70
252 魏　琴，杜　斌等．山东冶金，1991；13(1)：50
253 高明雄，张发宝等．冶金分析，1991；11(2)：48
254 戚文彬，黄辰龙等．化学试剂，1991；13(1)：6
255 王弗孔．岩矿测试，1994；13(4)：277
256 周各成等．冶金分析，1986；6(2)：15
257 秦光荣等．分析试验室，1983；2(4)：1
258 吴太白等．分析化学，1985；13(8)：609
259 李秀玲等．理化检验（化），1994；30(6)：362
260 金　伟．冶金分析，1995；15(1)：54
261 范存忠，郭坤安．冶金分析，1982；2(6)：37
262 朱玉瑞等．理化检验(化)，1983；19(1)：18
263 龚国权，王怀公．冶金分析，1984；4(6)：28
264 冯　胜，高植生．化学通报，1986；(3)：34
265 沈含熙等．冶金分析，1986；6(6)：13
266 张　光等．分析化学，1987；15(11)：1004
267 左士瑜等．分析试验室，1987；6(3)：23
268 阮敏达．分析试验室，1986；5(10)：34
269 陈玉缓等．分析试验室，1986；5(12)：28
270 张有贤等．理化检验(化)，1988；24(1)：7
271 沈含熙等．分析化学，1988；16(1)：69
272 刘　钢等．分析化学，1986；14(10)：780
273 杨桂法等．湖南大学学报，1986；13(3)：94
274 周发连等．分析化学，1989；17(9)：809
275 陈亚华等．冶金分析，1989；9(4)：27
276 戚文彬等．分析试验室，1988；7(12)：4
277 林辉概等．理化检验(化)，1989；25(5)：262
278 方国桢等．理化检验(化)，1989；25(3)：144
279 杨桂法等．理化检验（化），1989；25(2)：99
280 童沈阳等．北京大学学报(自)，1990；26(6)：641
281 张　光，杨合情．分析化学，1990；18(10)：933
282 金　伟．理化检验(化)，1990；26(6)：355
283 潘教麦，叶　红等．分析试验室，1990；9(5)：16
284 滕恩江，魏复盛等．上海环境科学，1990；6(11)：21
285 金　谷，朱玉瑞等．化学试剂，1991；13(1)：55
286 邝平先，徐理阮．化学试剂，1991；13(5)：277
287 白育伟，刘　彬．分析试验室，1992；11(1)：62
288 卞立新等．理化检验(化)，1992；28(3)：158
289 骆国钧等．湖南大学学报(自)，1992；19(6)：84
290 孙培培等．化学试剂，1992；14(5)：307
291 孙登明等．冶金分析，1993；13(3)：21
292 张文德等．冶金分析，1993；13(5)：18
293 王玉枝等．分析测试学报，1993；12(4)：60
294 蒋国新．冶金分析，1993；13(5)：53
295 陈展光等．冶金分析，1993；13(5)：14
296 孙培培．岩矿测试，1994；13(1)：33
297 蒋国新．理化检验(化)，1994；30(3)：166
298 江万权等．分析化学，1994；22(12)：1259
299 李玲颖等．高等学校化学学报，1990；11(2)：144
300 王椿林等．化学试剂，1984；6(4)：239
301 郑用熙，王镇棣．分析化学，1983；11(8)：596
302 刘长松等．分析化学，1984；14(3)：218
303 蒋仁礼等．临床检验杂志，1989；7(1)：I
304 汪洪亮等．临床检验杂志，1988；6(4)：181
305 王亦根等．上海医学检验杂志，1990；5(2)：89
306 李生泉等．山西大学学报(自)，1989；12(3)：293
307 汪洪亮等．中华医学检验杂志，1988；11(5)：280
308 张来之，崔　惠．分析化学，1991；19(7)：775
309 蒋惠铭，叶　青等．理化检验(化)，1992；28(1)：42
310 陈德萍等．江西冶金，1993；13(1)：33
311 何　斌．土壤通报，1993；24(5)：236
312 江淑芙．山东大学学报(自)，1982；(1)：86
313 申学琴等．理化检验(化)，1985；21(4)：222
314 许俊英等．兰州大学学报(自)，1986；22(4)：59
315 胡守坤等．化学试剂，1987；9(5)：304
316 徐钟隽等．化学学报，1989；47(9)：918
317 陈朝阳．环境与健康杂志，1990；7(6)：272
318 王毅修等．电镀与环保，1992；12(4)：34
319 敖登高娃等．内蒙古大学学报(自)，1994；25(6)：697
320 姚绍龙．四川师范大学学报(自)，1994；15(3)：267
321 李隆弟，郑用熙．冶金分析，1984；4(1)：7
322 方国桢，刘　鑫．高等学校化学学报，1986；7(4)：315
323 龚国权，王怀公．分析试验室，1983；2(2)：12
324 许俊英等．冶金分析，1986；6(1)：23
325 李玲颖等．分析化学，1985；13(4)：285
326 常文保等．贵金属，1985；6(1)：17
327 慈云祥等．高等学校化学学报，1986；7(3)：206
328 王　磊，孙培培．贵金属，1991；12(3)：50
329 朱有瑜，杨　莉．分析化学，1991；19(7)：778
330 朱有瑜，曹恒杰等．分析化学，1992；20(1)：15
331 赵建为，徐其亨．云南冶金(科)，1991；20(3)：48
332 朱有瑜等．化学试剂，1993；15(5)：274
333 苏自奋等．分析科学学报，1993；9(4)：20
334 朱玉瑞等．分析化学，1994；22(8)：785
335 李　沄等．冶金分析，1994；14(3)：12
336 赵建为，曾佐涛等．分析试验室，1991；10(5)：17
337 朱利亚，吴瑞林．痕量分析，1991；7(2)：61
338 慈云祥等．化学试剂，1986；8(3)：131
339 李振亚等．科学通报，1988；33(9)：673
340 方国桢等．分析试验室，1994；13(2)：25
341 白继昌，胡可人．分析试验室，1984；3(2)：11
342 周执明等．痕量分析，1985；(3～4)：156
343 慈云祥等．分析化学，1986；14(7)：505
344 吴润身．分析化学，1984；12(10)：921
345 刘　忻．分析试验室，1984；3(6)：57
346 莫子彬等．分析化学，1985；13(6)：460
347 吴润身．冶金分析，1987；7(5)：11
348 吴相华等．分析试验室，1986；5(11)：34
349 吴双凤，肖　飞等．冶金分析，1992；12(3)：48
350 徐金华等．理化检验(化)，1992；28(4)：226
351 白继昌．化学试剂，1983；5(5)：277
352 周执明等．浙江工学院学报，1991；(1)：88
353 罗家清等．云南化工，1988；(3)：13
354 叶巍琛等．食品与发酵工业，1994；(4)：16
355 蒋惠铭等．精细石油化工，1991；(1)：53
356 王心华．冶金分析，1984；4(1)：58
357 杨正邦，向文升．分析试验室，1985；4(4)：23

358 刘锦昌，刘进平．分析化学，1984；12(2)：143
359 傅家琨．分析试验室，1986；5(12)：60
360 张文德．中华预防医学杂志，1989；23(2)：104
361 王苇鹏，沈云兴等．地质实验室，1989；5(1)：10
362 陈同森，胡 勇．冶金分析，1988；8(6)：18
363 罗家清，徐其亨．云南化工．1988；(3)：13
364 安宝兰．稀有金属材料与工程，1991；(2)：51
365 赵永凤等．安徽大学学报(自)，1992；19(1)：65
366 金 伟等．上海有色金属，1992；13(6)：31
367 李慧芝等．分析化学，1994；22(12)：1283
368 蔺各成等．冶金分析，1986；6(2)：15
369 吴 铮等．理化检验(化)，1986；22(3)：132
370 吴 铮等．分析化学，1987；15(9)：778
371 徐诗伟．分析化学，1987；15(5)：385
372 黄贤智等．分析化学，1986；14(10)：761
373 刘 然等．分析试验室，1987；6(7)：32
374 许光惠等．南开大学学报(自)，1993；(1)：83
375 詹才清，李 兰．冶金分析，1982；2(3)：38
376 刘绍璞，刘忠芳．化学世界，1984；23(4)：107
377 王振清等．冶金分析，1985；5(1)：1
378 沈含熙等．化学通报，1983；(10)：23
379 魏复盛，韩 白．分析试验室，1983；2(2)：28
380 张在整等．理化检验(化)，1984；20(4)：9
381 刘绮洪．分析试验室，1986；5(2)：9
382 刘绮洪等．冶金分析，1986；6(3)：18
383 杨 炯等．冶金分析，1988；8(3)：52
384 何鼎峰．分析试验室．1986；5(9)：62
385 詹才清．化学试剂，1986；8(4)：253
386 赵书林等．冶金分析，1989；9(1)：8
387 潘教麦等．理化检验(化)，1989；25(4)：194
388 李声筠等．分析化学，1990；18(2)：139
389 吴太白等．冶金分析，1991；11(3)：48
390 王振清等．南开大学学报(自)，1990；(4)：5
391 晋 勇．四川有色金属，1990；(4)：33
392 李长华等．冶金分析，1990；10(5)：21
393 陈亚华等．郑州大学学报(自)，1991；23(2)：88
394 薛月霞等．冶金分析．1990；10(5)：4
395 彭维綦，张华山，喻忠义．武汉大学学报(自)，1990；(1)：87
396 郭志英，彭宏珍．冶金分析，1990；10(3)：53
397 滕恩江，魏复盛等．上海环境科学，1989；8(7)：25
398 王德新等．冶金分析，1984；4(5)：251
399 孙登明等．分析试验室，1993；12(5)：31
400 王 磊等．岩矿测试，1994；13(1)：30
401 朱玉瑞等．分析试验室，1994；13(6)：34
402 吴铁民，李学成．分析化学，1982；10(4)：235
403 王东进等．高等学校化学学报，1985；6(11)：980
404 刘汉初等．岩矿测试，1987；6(3)：172
405 蔡金芳等．岩矿测试，1990；9(3)：243
406 刘汉初等．光谱实验室，1991；8(4,5)：147
407 孙维林等．分析化学，1993；21(1)：93
408 宋金如等．岩矿测试，1992；11(4)：322
409 冯亚平等．化学试剂，1983；5(2)：77
410 沈乃葵等．理化检验(化)，1983；19(4)：2
411 王长发．分析试验室，1985；4(10)：25
412 郭春山等．冶金分析，1982；2(1)：27
413 高隆元等．岩矿测试，1986；5(2)：97
414 郭志英．分析试验室，1990；9(1)：68
415 侯廷良等．理化检验(化)，1989；25(3)：180
416 黄青瑜等．中国环境监测，1989；5(5)：22
417 杨晓云等．化学通报，1992；(5)：37
418 杨晓云等．云南大学学报(自)，1993；15(2)：97
419 张在整等．冶金分析，1988；8(1)：11
420 高 峰等．华东师范大学学报(自)，1988；(4)：61
421 王东进等．化学试剂，1992；14(2)：77
422 宋金如等．岩矿测试，1987；6(3)：176
423 徐钟隽等．理化检验(化)，1990；26(6)：324
424 吴干卿等．冶金分析，1985；5(3)：7
425 高家隆等．兰州大学学报(自)，1983；(4)：102
426 刘 忻．分析试验室，1986；5(4)：33
427 王苇孔等．地质实验室．1994；10(4,5)：277
428 刘静华．理化检验(化)，1987；23(5)：228
429 杨桂法等．分析试验室，1986；5(11)：4
430 张 光等．分析化学，1987；15(11)：1004
431 杨桂法等．高等学校化学学报，1987；8(5)：421
432 苗凤琴等．分析化学，1987；15(8)：736
433 张 光等．分析化学，1987；15(4)：364
434 陈安子等．环境化学，1988；7(2)：65
435 周发连等．分析试验室，1990；9(1)：71
436 周发连等．理化检验(化)，1989；25(2)：68
437 黄青瑜等．四川大学学报(自)，1989；26(3)：330
438 苏剑雄等．华侨大学学报(自)，1990；11(1)：36
439 胡志孟．环境健康杂志，1989；6(5)：27
440 周发连等．岩矿测试，1989；8(3)：191
441 宋有瑜等．分析化学，1988；16(10)：924
442 张毅贞等．广西化工，1989；(1)：45
443 谢丽莎等．中国中药杂志，1990；15(6)：28
444 乌日娜等．内蒙古师大学报(自)，1988；(4)：16
445 陶宗祥等．化学世界，1989；30(6)：255
446 罗宗铭等．理化检验(化)，1989；25(5)：274
447 肖锦龙等．合肥工业大学学报(自)，1991；14(2)：105
448 阮敏达．分析试验室，1991；10(3)：64
449 吴其庄等．理化检验(化)，1991；27(2)：83
450 史慧明等．分析化学，1991；19(12)：1421
451 王秀燕等．分析化学，1990；18(9)：848
452 郭慧清等．光谱仪器与分析，1990；(3)：29
453 刘有忠等．中华预防医学杂志，1990；24(4)：246
454 姚凤姬等．分析化学，1992；20(3)：303
455 王 勇等．陕西师大学报(自)，1991；19(2)：85
456 乔占平．南都学坛(自)，1992；12(2)：71
457 朱玉瑞等．分析化学，1992；20(11)：1309
458 王 磊等．冶金分析，1993；13(1)：18
459 卞立新等．冶金分析，1993；13(1)：23
460 徐 斌等．化学世界，1992；33(11)：507
461 闫永胜等．分析试验室，1993；12(2)：81
462 陈兰化等．冶金分析，1993；13(3)：40
463 张 铣．冶金分析，1993；13(6)：51
464 虞光禹等．冶金分析，1994；14(5)：29
465 朱玉瑞等．分析试验室，1995；14(1)：22
466 蔡耀中，陈晓明．分析化学，1986；14(3)：201
467 刘锦昌，赵国雄．分析化学，1985；13(9)：679
468 李志良等．稀有金属，1985；4(3)：73
469 李志良等．化学试剂，1986；8(1)：20
470 林辉详等．分析试验室，1987；6(2)：19
471 张东瑞等．分析化学，1990；18(6)：504
472 王保宁等．分析化学，1988；16(10)：878
473 尚子真，陈金花．浙江工学院学报，1989；6(4)：98
474 汤永强．分析试验室，1991；10(6)：31
475 汤永强．冶金分析，1992；12(5)：51

表 17-11 含有两性表面活性剂的体系的吸光光度分析法应用示例

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Al	CAS-乙醇-DDMAA	pH=5.5~8.0	630	13.5	(0~4)μg/25ml	—	1
	CAS-DDMAA(十二烷基二甲基氨基乙酸)	pH=6.2~7.4	630	16		1:1:4	2
	铬天青 S-HDMAA-乙醇	pH=5.5~8.0	620	13.8	(1~5)μg/25ml Al	—	3
	邻氯苯基荧光酮-ODMAA	pH6.0	570	18.6	—	—	4
	邻氯苯基荧光酮-CDMAA	pH6.5	565	14.0	(0~0.4)μg/25ml	1:2	5
	水杨基荧光酮-ODMAA	pH=5.5~6.5	558	19.0	(0~1.6)μg/10ml	1:2	6
Au	金试剂-DDMAA	pH=4.5~5.6	555	14.3	(1~12.5)μg/25ml Au	1:4	7
Be	CAS-DDMAA	pH=6.1~7.5	620	10	(0~2.0)μg/25ml	1:1:2	8
Cd	四(邻氯对磺酸基苯基)卟啉-CDMAA,同时测 Pb	pH10.7 咪唑催化	437	56.0	(0~5)μg/25ml	1:1	9
Cr(Ⅲ)	铬菁 R< TDMAA / CDMAA	pH3.5	587.5	12.2 11.4	(0~10)μg/25ml Cr	—	10
Cu	CAB(铬天青 B)-DDMAA	pH=6.2~7.8	677	19.2	(3.75~13.75)μg/25ml	1:2:2	11
	溧蓝 6B-溴化十八烷基二甲基羧甲基铵	pH=7.4~9.2	677	22	(0.03~1.0)μg/ml Cu	1:1:4	12
Fe	CAS-DDMAA	pH=6.5~7.5	640	12	(0~20)μg/25ml	1:2:2	13
	CAS-DDMAA-乙醇	pH=6.0~8.0	645	20	(0~10)μg/25ml	1:2:2	14
	苯基荧光酮-DDMBA	0.1 mol·L^{-1} NaOH	650	16.3	(0~6)μg/25ml	1:2:3	15
Ni	5-Cl-PADAB-烷基聚乙二醇醚硫酸酯	pH=7.4~8.4	537	8.1	—	1:2	16
Pd	溧蓝 6B-CDMAA-TX-100	pH6.8	645	13	(0~4.0)μg/25ml Pd	—	17
Re	6,8-二磺酸基萘-偶氮氯膦-溴化十六烷基(羧甲基)二甲胺	0.3mol·L^{-1} HCl	692.5	4.17~19.2	(0~10)μg/25ml Re_2O_3	1:1:1	18
Sc	CAS-DDMAA	pH=7.0~7.8	620	30	(0~5)μg/25ml	1:2:4	19
	CAS-溴化十四烷基羟甲基二甲铵-乙醇	pH=6.2~7.5	607	23.4	(0~5)μg/25ml	1:2:4:5	20
Ta	邻氯苯基荧光酮-CDMAA-OP	pH7	560~562	62.9	(0~4)μg/25ml Ta_2O_5	1:3	21
Th	CAS-DDMAA	pH=6.9~7.7	625	16		1:3	22
Zr	CAS-DDPAA(十二烷基二聚氧乙烯基乙酸)	pH=5.2~6.6	580	10.9	(0~20)μg/25ml	1:2	23

本表参考文献：

1 史慧明等.冶金分析,1983;3(3):141
2 史慧明，张贵珠．分析化学，1982；10(3)：148
3 李金和等．理化检验（化），1988；24(5)：272
4 晋勇．冶金分析，1991；11(5)：54
5 杨定国．理化检验（化），1990；26(6)：337
6 陈同森，晋勇，陈兆鹏．湖南大学学报，1991；18(3)：77
7 薛光．化学试剂，1989；11(3)：180
8 史慧明等．化学试剂，1982；4(4)：204
9 张华山，肖玲，王圣．分析化学，1992；20(1)：82
10 殷明志等．北京科技大学学报，1989；11(3)：270
11 李金和等．分析试验室，1984；3(5)：25
12 蓝蔚等．理化检验（化），1990；26(3)：145
13 史慧明等．化学试剂，1983；5(6)：321
14 史慧明等．理化检验（化），1984；20(5)：封 2
15 冯泳兰．冶金分析，1994；14(2)：52
16 朱有瑜等．应用化学，1986；3(1)：69
17 杨定国．分析试验室，1991；9(3)：66
18 胡可人等．分析试验室，1984；3(5)：28
19 史慧明等．分析化学，1982；10(12)：716
20 白继昌．分析试验室，1985；4(2)：27
21 杨定国．冶金分析，1990；10(2)：39
22 史慧明等．分析化学，1983；11(11)：826
23 史慧明等．化学试剂，1982；4(4)：204

表 17-12 含有混合型表面活性剂的体系的吸光光度分析法应用示例

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Al	CAS-CTMA-OP	pH=4.8~7.5	620	15.0	(0~5)μg/25ml	—	1
	CAS-CDMAA-OP	pH=5.5~6.0	620	13.0	(0~5)μg/25ml	—	2

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Al	铬天青 S-TPB-OP	pH=5.6～7.0	610～615	11.5	(0～5)μg/50ml Al	—	3
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB-OP	pH6.8	556	18.3	(0～5)μg/25ml Al	1∶2	4
	铬天青 S-OP-CPB	pH6.7	630	13.5	(0～20)μg/50ml	1∶3	5
	铬天青 R-CPC-TritonX-100	pH5.5	580	12.6	(0～6.1)μg/25ml	1∶4	6
	湖蓝 6B-CTMAB-全氟辛酸钠	pH=4.6～5.5	660	25.8	(0～2)μg/25ml Al	—	7
Ag	3,5-DiCl-PADAT-十二烷基磺酸钠-TritonX-200	pH=3.5～4.5	490	5.4	(0.1～1)mg·L^{-1}	1∶4∶4	8
	3,5-DiCl-PATAT-阴+非	pH=7.9～10.2	515	4.3	(0～25)μg/25ml	—	9
	镉试剂 2B-SDS-TritonX-100	DMFpH = 8.5～9.8	560	12.3	(0～18)μg/25ml	—	10
	meso-四(4-氯苯基)卟啉-TritonX-100-CTMAB	碱性溶液中	426	39.4	(0～3.2)μg/10ml	1∶2	11
	镉试剂 2B-壬基酚-10EO-SDS	pH=9～10.0	560,450	16.0	(0～20)μg/25ml	—	12
	phen-曙红-Tween-20-PVA	pH=5～6	556	13.5	(0～20)μg/25ml	—	13
Be	湖蓝 6B-溴化已基三甲铵十十二烷基硫酸钠	pH=6.5～7.5	628	13.3	(0.02～0.088)μg·ml^{-1}	1∶1	14
	4,5-二溴基苯荧光酮-CTMAB-Tween-60	pH=8.0～9.0	568	170.0	0～6.8μg·ml^{-1}	1∶1∶2	15
	CAS-CTMAB-Tween-80	pH=5.5～7.1	607	13.0	—	1∶2	16
	CAS-SDBS-OP	pH=5.0～6.0	605	8.5	(0～2.5)μg/25ml	1∶2	17
	CAS-两性表面活性剂-Tween-80	—	614	12.0	(0～1.5)μg/25ml	—	16
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB-Tween-20	pH=8.1～9.1	565	96	(0～0.2)μg/25ml Be	1∶1	18
	铬天青 B-CPC-OP	pH5.5	618	9.5	—	—	19
	铬天青 S-zeph-TritonX-100	pH5.9	610	10.4	(0～1.2)μg/25ml	—	20
		—	—	1.4	—	—	21,22
Bi	5-[6-溴-(2-苯并噻唑偶氮)]-8-羟基喹啉-CTMAB-SDS	pH=3.0～3.8	560	16.8	(0～7)μg/10ml Bi	—	23
Cd	4,5-二溴苯基荧光酮-CPB-Tween-80	pH11.0	610	21.0	(0～4)μg/10ml	1∶1∶2	24
	meso-4-(3-氯苯基)卟啉-8-羟基喹啉-TritonX-100-SDS-CPB	—	432	31.4	(0～5)μg/25ml	—	25
	meso-四(3,4 次甲二氧基苯基)卟啉-SDS-CPB-Triton X-100	—	439	49.0	(0～8)μg/25ml	1∶1	26
	丁基罗丹明 B-Triton X-100-PVA	0.3 mol·L^{-1} HNO_3	640	114	(0～1.2)μg/25ml	—	27
	phen-四碘荧光素-Triton X-100-PVA	pH5.4	560	6.6	(0～10)μg/10ml	—	28
	二乙醛-双-(-2-羟基缩苯胺)-TritonX-100-PVA-CTMAB	—	—	1.12	—	—	29
	3,5-DiBr-PADAP-SDS-OP	pH8.6	575	14.4	(0～16)μg/25ml Cd	—	30
	4,4'-二(偶氮苯)重氮氨基苯-Triton-100-SDBS	pH9.8	526	20	(0～10)μg/25ml	—	31
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB-乳化剂 OP	pH11.8	605	15.1	(0～12)μg/25ml	1∶2	32
	二溴硝基苯基重氮氨基偶氮苯-Tween-80-SDBS	pH8.5	500	15.2	(0～28)μg/25ml	1∶3	33
	4,5-二硝苯基荧光酮-CPB-Tween-20	pH=10.2～12.3	610	18	(0～20)μg/50ml	1∶2	34
Co	氯化水杨基荧光酮-CPB-Tween-80	pH8.0	565	16.8	(0～6.0)μg/25ml Co	—	35
	四-(4-氯苯基)卟啉-SLS-OP	pH9.6	420	79.4	(0～3.2)μg/25ml Co	1∶1	36
	邻硝基苯基荧光酮-CPB-OP	pH10.5	640	15.9	(0～14)μg/25ml	—	37

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Co	邻氯苯基荧光酮-溴化十六烷基吡啶-乳化剂OP	pH10	613.5	18.5	(0~14)μg/25ml	1∶2	38
Cr	4-(2-噻唑偶氮)间苯二酚-SDS-OP	pH5.2	525	4.4	(0~50)μg/25ml Cr	—	39
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB-SDBS	pH6.4	586	18.1	(0~10)μg/25ml Cr	1∶3	40
Cu	水杨基荧光酮-CTMAB-Brij-35	pH=6~9	563	15.4	—	1∶2	41
	SAF-PVA-Tween-20	pH10.2	563	16.8	(0~20)μg/25ml	—	42
	二溴硝基苯基重氮氨基偶氮苯-TritonX-100-SDBS	pH5.4	516	29	(0~14)μg/25ml	1∶3	43
Fe	BPR-ZePh+羟甲基纤维素钠	pH=3.0~4.5	660	5.2	(0~40)μg/50ml	1∶2∶3	44
	2-(2-苯并噻唑偶氮)-5-二甲氨基苯甲酸-SDS-TritonX-100	pH=5.2~6.6	640	7.98	(0~16)μg/25ml	1∶2	45
	CAS-CTMAB-OP	pH=5.6~7.0	640	20.0	(0~10)μg/25ml	—	1
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB-TritonX-100	pH=4.4~5.0	470	110.0	(0~50)μg·L^{-1}	1∶3∶6	46
	铬天青S-CTMAB-TritonX-100	pH=5~7		12		—	47
	N-苯甲酰苯基羟胺-OP-SDS	pH=2.0~5.5	470	0.4	(0~120)μg/25ml	1∶2	48
	噻唑偶氮二乙氨基苯甲酸-SDS-Tween-80	pH=3.8~5.5	610	15	(0~0.52)μg·ml^{-1}	1∶3	49
	对硝基苯基荧光酮-CPB-TritonX-100	pH6.5	582	16.5	(0~10)μg/25ml	—	50
	邻硝基苯基荧光酮-OP-CPB	pH6.4	585	16	(0~10)μg/25ml	—	51
Ga	铬天青B-CPC-TritonX-100	pH5.5	650	13.2	(0~12)μg/25ml Ga	1∶3∶3	52
	溴连苯三酚红-CTMAB-Tween-80	pH=2.87~3.42	528	57.2	(0.1~1.0)μg/25ml Ga	—	53
	邻氯苯基荧光酮-F^--CDMAA-TritonX-100	pH=6.5~7.8	565	117.4	(0~6)μg/25ml	1∶2	54
	铬天青R-CTMAB-TritonX-100	pH5.0	590	10.1	(0~8)μg/25ml	—	55
Ge	溴连苯三酚红-O_4PB-Tween80-H_2O_2	pH=2.5~2.77	527	101	(0.1~0.8)μg/10ml Ge	—	56
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB-Tween-80	5mol·$L^{-1}H_2SO_4$		15.5	(0~12)μg/25ml	1∶4	57
	P-ClPF-CPB-TritonX-100	(1.5~4.0)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	515	28	(0~12)μg/50ml	1∶3	58
Hg	4,4'-四乙基二胺二苯甲硫酮-SDBS-TritonX-100	pH4.6	535	20.0	(0~25)μg/25ml	1∶4	59
	I^--结晶紫-Triton X-100-PVA	(0.018~0.04)mol·$L^{-1}HNO_3$	545	23	(0~25)μg/50ml	1∶4∶2	60
In	BPR-OP-CTMAB	pH5	625		(10~140)μg/25ml	—	61
	维多利亚蓝4R-SCN^--OP-阿拉伯树胶	pH=1.1~1.7	570	102	(0~3)μg/25ml	—	62
Mg	二甲苯胺蓝I-CTMAB-OP	pH=9.8~11.5	570	2.5	(0~8)μg/25ml Mg	—	63 64
	4,5-二溴苯基荧光酮-CPB-OP	pH11	610	13.8	(1~10)μg/25ml MgO	1∶2	65
	邻氯苯基荧光酮-CPC-OP	pH12	612	13.9	(0~0.2)μg·ml^{-1}	1∶3	66
Mn	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB-OP	pH=8.4~11.0	615	15.3	—	1∶2	67
	二氯苯基荧光酮-CPB-OP	pH10	595	16.4	(0~5)μg/25ml	—	68
	邻硝基苯基荧光酮-CDMAA-OP	pH=8.1~10.2	602	17.0	(0~10)μg/25ml	—	69
Mo	硫氰酸盐-OP10-十二烷基磺酸钠	—	470	—	—	—	70
Ni	5-Cl-PADAB-SLS-Tween-80	pH7.1	532	—	—	—	71
	邻硝基苯基荧光酮-CPB-OP	pH10.8	630	12.0	(0~12)μg/25ml	1∶3	72
	5-Br-PADAP-Tween-80-SDS	pH5.6	558	11.6	(0~0.36)μg·ml^{-1}	—	73

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Ni	meso-四(4-甲基-3-磺基苯)卟啉-CPC-Tween-60	pH=8.0~9.0	418	22.7	(0~1.5)μg/10ml	1:1	74
	邻氯对硝基苯基重氮氨基偶氮苯 SDBS-TritonX-100	pH8.7	510	13.3	(0~8)μg/25ml	—	75
Nb	二溴苯基荧光酮-CTMAB-OP	(1.5~3.0)mol·L^{-1}HCl	—	21	(0~3)μg/10ml	1:2	76
	BPR-CPB-OP	pH=6.5~7.0	635	14.1	(0~22)μg/50ml	1:4:8	77
	水杨基荧光酮-CTMAB-TritonX-100	0.05mol·L^{-1} H_2SO_4	520	33.2	(0~6)μg/25ml Nb_2O_5	—	78
Pb	BPR-OP-CTMAB	pH5	625		(10~140)μg/25ml	—	79
	meso-四(4-乙酰氧基苯)-卟啉-SDS-CPB	pH9.5	466	26.0	(0~6)μg/10ml	—	80
	BPR-phen-CTMAB-TritonX-100	pH6	620	5.29	(5~200)μg/50ml	1:1:2	81
	I^--丁基罗丹明 B-阿拉伯树胶-TritonX-100	pH=3~4	614	23.0	(0~0.4)μg/ml		82
Pd	4,4-四乙基二胺二苯甲硫酮-SDBS-TritonX-100	pH4.0 的 H_3PO_4 溶液	535	21.0	(0~10)μg/25ml	1:4	59
	5-苯基偶氮-8-氨基喹啉-TritonX-100-CTMAB	pH2.8	590	4.3	(0~16)μg/25ml	—	83
	硫代米蚩酮-Triton X-100-SDS	—	555	—	(0~10)μg/25ml	—	84
	四(4-氯苯基)卟啉-Triton X-100-SDS	碱性	432	24.6	(0~8)μg/25ml	1:1	85
	meso-四(3-溴-4-羟基-5-甲氧基苯)卟啉-SDS-OP	—	422	12.7	(0~12)μg/25ml	1:2	86
Pt	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB-OP	pH=3.8~4.5	540	83.2	(0~0.3)μg·ml^{-1}	1:4	87
	卟啉(T(4-AOP)P)-SDS-OP-Cd	pH=11.0~11.7	422	88.2	(0~2)μg/10ml	1:1	88
RE	偶氮硝酸-TPB-+二烷基磺酸钠	HAc	730	30	(0~10)μg/25ml	—	89
Rh	四(4-乙酰氧基苯)卟啉-SDS-Triton X-100	pH=9.5~10.5	420	87.8	(0~1.2)μg/10ml	1:1	90
Sb	BPR-CPB-TritonX-100	(0.16~0.48)mol·L^{-1}	520	3.05	(0~200)μg/50ml		91
	邻氯苯基荧光酮-CTMAB-OP	0.24mol·L^{-1}HCl	518	7.91	(0~12)μg/25ml	1:2 1:5	92
Sc	溴蓝 6B-溴化辛基三甲铵+硫酸锌酯钠	pH=8~9	638	22.2	(0~6)μg/25ml	—	93
	CAS-CPC+OP	pH=5.1~6.5	612	15.5	(0~10)μg/25ml	1:2:2	94
	铬天青 S-CTMAB-TritonX100	pH6.8		25.9	(0~4)μg/25ml		95
	溴蓝 6B-TPB-全氟辛酸钠	pH5.76	643	24.8	(0~4)μg/25ml Sc	1:3	96
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB-Tween-60	pH=5.7~6.5	590	22.6	(0~0.36)μg·ml^{-1}	1:2:4	97
	乳酸-溴吡啶偶氮二乙氨基酚-TritonX-100	pH8.5	565	6.08	(0~18)μg/25ml	—	98
Sn	BPR-CPB-Tween80	pH=2.6~2.9	530	32.0	(0.2~5.0)μg/25ml	—	99
Ta	水杨基荧光酮柠檬酸(H_2O_2)-CTMAB-TritonX-100	(0.4~3.6)mol·L^{-1}的 H_2SO_4	511	14.0	(0~9.5)μg/25ml	—	100
Th	对溴偶氮氯膦-TPC-OP	0.6mol·L^{-1}HCl	685	13.6	(0~25)μg/25ml Th	—	101
Ti	间氯基苯基荧光酮-OP-DDMAA	pH=1.5~2.5	540	14.6	(0~7.5)μg/25ml	—	102
	苯基荧光酮-Tween-80-PVA	0.06mol·L^{-1}	535	19.1	(0~9)μg/50ml	—	103
	邻硝基苯基荧光酮-平平加-SDS	(0.015~0.065)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	542	20.2	—	1:4	104
	四种三羟基荧光酮 9-取代物-取代的月桂酰胺钠盐-十二聚氧乙烯 23 醚(Brij-35)	0.5mol·L^{-1}HCl	532	20.2	(0~5)μg/25ml	1:3	105
U	CAS-DDMAA-TritonX-100	pH=6.0~8.5	615	11	—	1:1	106
	水杨基荧光酮-Zeph-OP	pH5	555	17.5	(0~25)μg/25ml	1:4:2:4	107

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
V	偶氮氯膦Ⅱ-CTMAB-OP	pH4.4	620	2.29 3.12	(0～8)μg·ml^{-1}	1∶1∶2	108
	PAR-CV-OP-CTM-AB	pH=3.2～4.8	615	19.2	(0～20)μg/25ml	—	109
W	二溴苯基荧光酮-CTMAB+OP	(2～2.8)mol·L^{-1}HCl	528	13.5	(0～6)μg/10ml	1∶2	110
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB-OP	1.7mol·L^{-1}HCl	531	—	—	—	111
	水杨基荧光酮-CTMAB-Tween40	(0.1～0.4)mol·L^{-1}的HCl	519	14.3	(0～25)μg/25ml	—	112
	邻硝基苯基荧光酮-CTMAB-Tween-40	(0.1～0.5)mol·L^{-1}的HCl	524	12.3	(0～30)μg/25ml	—	113
Y	5-Br-PADAP-CPC-OP	pH=8.0～9.8	580	10	(0～45)μg/50ml Y	1∶4∶3	114
Zn	铬天青S-喹啉-CTMAB-Tween 20	pH9	600	12.1	(0～16)μg/25ml Zn	1∶2∶3∶2	115
	3,5-DiBr-PADAP-SDS-OP	pH8.6	566	15.9	(0～7.2)μg/10ml Zn	1∶3	116
	phen-四碘荧光素-阿拉伯树胶-TritonX-100	pH=5.2～5.5	560	7.0	(0～6)μg/10ml	1∶4	117
	XO-CTMAB-Tween-80	pH9.5	610	—	(0.08～0.48)μg·ml^{-1}	—	118
	5-Br-PADAP-SDBS-Tween-80	pH=6.5～7.0	565	17	(0～0.5)μg·ml^{-1}	—	119
	喹啉偶氮萘二磺酸-CPC-OP	pH5.8	660	14.6	(0～14)μg/25ml	1∶2	120
Zr	二溴苯基荧光酮-CTMAB-Tween-80	(2～2.75)mol·L^{-1}HCl	540	19	(0～3.75)μg/10ml	1∶4	121
	CAB-DDMAA	pH=1.2～2.2HCl	660	21.7	(1～20)μg/25ml	—	122
	CAB-ODMAA-OP	pH=1.0～1.5	660	19.8	(2～16)μg/25ml	1∶3	123
	硝基磺酚K-CTMAB-TritonX-100	(0.05～0.3)mol·L^{-1}的HCl	668	11.0	(2.0～20.0)μg/25ml	—	124
	DCS偶氮胂-CPB-OP	0.24mol·L^{-1}HCl	617	6.37	(0～20)μg/25ml ZrO_2	1∶3	125
	4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB-Tween-80	0.5mol·L^{-1}HCl,	560	6.62	(0～16)μg/25ml	1∶4	126
	二溴羧基偶氮胂-乙醇-CPB-OP	HCl	626	6.0	(0～25)μg/25ml	—	127

本表参考文献：

1 张贯珠等. 冶金分析，1986；6(5)：8
2 戴慕文等. 分析化学，1987；15(1)：80
3 柳治东. 分析试验室，1988；7(10)：60
4 晋　军. 分析试验室，1990；9(2)：40
5 张　统等. 理化检验（化），1991；27(3)：150
6 罗宗铭等. 广东工学院学报（自），1991；8(4)：35
7 郑用熙，李　敏. 分析试验室，1989；8(6)：5
8 刘玉茹等. 分析化学，1985；13(3)：205
9 朱有瑜等. 杭州大学学报（自），1985；359
10 朱有瑜等. 杭州大学学报（自），1991；18(1)：60
11 程书麟等. 分析化学，1992；20(1)：7
12 朱有瑜等. 理化检验（化），1991；27(4)：223
13 曾纪铭等. 黑龙江大学自然科学学报，1992；9(1)：99
14 郑用熙等. 分析化学，1984；12(9)：828
15 庄锦英等. 分析化学，1987；15(10)：874
16 张贯珠等. 分析试验室，1986；5(7)：5
17 杨定国等. 应用化学，1987；4(3)：64
18 晋　军. 重庆环境科学，1989；11(5)：57
19 杨定国等. 冶金分析，1989；9(2)：28
20 向青菊. 化工冶金，1990；11(4)：339
21 段群章. 湖南冶金，1992；(4)：26
22 段群章. 冶金分析，1992；12(5)：32
23 杨桂法等. 分析化学，1988；16(9)：843
24 王东进，潘庆洪，庄锦英等. 化学试剂，1991；13(3)，182
25 于善琨，陈　平. 电镀与精饰，1990；12(1)：45
26 黄泽兴等. 高等学校化学学报，1990；11(11)：1289
27 胡　捷，高立均. 环境化学，1991；10(2)：62
28 江淑芙，沈　伟. 理化检验（化），1990；26(6)：347
29 戚文彬等. 杭州大学学报（自），1992；19(1)：76
30 陈同森等. 湖南大学学报，1989；16(2)：130
31 朱有瑜等. 理化检验（化），1992；28(4)：222
32 夏道沛等. 地质实验室，1993；9(1)：1
33 孙培培等. 分析化学，1993；21(9)：996
34 晋　勇. 四川有色金属，1993；(3)：53
35 蔡耀中等. 地质实验室，1990；6(2)：67
36 孙　鹏等. 分析化学，1990；18(5)：475
37 夏道沛等. 冶金分析，1992；12(2)：10
38 曹小安等. 南昌大学学报（理），1993；17(2)：61
39 郑礼胜等. 冶金分析，1989；9(4)：5
40 陈同森等. 环境化学，1988；7(5)：58
41 丁明玉等. 岩矿测试，1987；6(3)：179
42 李金和等. 分析化学，1986；14(8)：587
43 胡　浩等. 分析化学，1994；22(12)：1228
44 徐其亨. 化学试剂，1982；4(4)：214
45 朱有瑜等. 化学试剂，1987；9(6)：355
46 王东进等. 分析化学，1987；15(8)：689
47 朱利中等. 杭州大学学报（自），1990；17(1)：57
48 肖满田. 理化检验（化），1991；27(1)：10
49 陈同森等. 湖南大学学报（自），1992；19(3)：80
50 胡　浩等. 理化检验（化），1994；30(4)：208
51 胡　浩等. 冶金分析，1995；15(2)：38
52 乌云平等. 冶金分析，1990；10(2)：16
53 徐一成等. 北京大学学报（自），1990；26(2)：160

54 杨定国．岩矿测试，1990；9(3)：187
55 雷克润等．湖南有色金属，1993；9(4)：246
56 徐一戌等．化学试剂，1989；11(5)：257
57 曹小安等．理化检验（化），1992；28(1)：28
58 王献科等．湿法冶金，1994；(1)：62
59 詹才清等．分析化学，1987；15(6)：535
60 王献科等．冶金分析，1991；11(1)：19
61 徐其亨等．分析化学，1983；11(7)：485
62 刘绍璞等．痕量分析，1990；(3,4)：72
63 肖精田．理化检验（化），1989；25(1)：8
64 肖精田．球 铁，1989；(4)：53
65 夏道沛，张建军，谢尉法．化学试剂，1989；11(3)：186
66 陈同森等．岩矿测试，1994；13(4)：254
67 丁明玉等．化学试剂，1987；9(5)：260
68 王东进等．岩矿测试，1991；10(2)：158
69 郭采文等．化学世界，1984；25(2)：54
70 陈同森等．湖南大学学报（自），1993；20(4)：67
71 杨克俭等．冶金分析，1988；8(5)：13
72 夏道沛等．地质实验室，1991；7(5)：257
73 苏剑雄等．华侨大学学报（自），1991；12(2)：168
74 吴其庄等．冶金分析，1993；13(1)：15
75 孙登明等．冶金分析，1994；14(4)：28
76 王东进等．高等学校化学学报，1983；4(6)：809
77 张华丽等．分析化学，1984；12(9)：824
78 平锡康．理化检验（化），1992；28(3)：146
79 张 缨等．理化检验（化），1986；22(1)：35
80 王东进等．高等学校化学学报，1986；7(10)：886
81 王献科．冶金分析，1986；6(4)：13
82 罗宏俊等．辽宁大学学报（自），1991；18(2)：7
83 杨桂法，杨奇波等．冶金分析，1990；10(5)：14
84 张贵珠，史慧明．离子交换与吸附，1990；6(3)：189
85 于普琨，白天麟，刘 伟．化学试剂，1990；12(6)：372
86 杨桂法等．湖南大学学报（自），1993；20(6)：51
87 王东进，庄锦英，潘庆洪．分析化学，1990；18(8)：766
88 王东进等．冶金分析，1994；14(3)：8
89 周执明等．高等学校化学学报，1986；7(3)：221
90 王东进等．冶金分析，1991；11(5)：18
91 吴太白．分析试验室，1988；7(4)：32
92 罗宗铭等．冶金分析，1991；11(3)：12
93 郑用熙等．分析化学，1982；10(3)：152
94 陈永祯等．分析试验室，1984；3(6)：20
95 孔令根等．稀有金属，1991；15(2)：146
96 臧嘉文等．中国稀土学报，1990；8(1)：74
97 王东进等．岩矿测试，1994；13(3)：180
98 罗宗铭等．分析化学，1995；23(2)：167
99 徐一戌等．分析化学，1987；15(11)：1028
100 吴 铮等．冶金分析，1986；6(5)：12
101 沈珠琴等．光谱实验室，1989；6(5)：212
102 张贵珠等．冶金分析，1990；10(6)：13
103 刘克善等．南方冶金学院学报，1991；12(2)：183
104 朱有瑜等．分析化学，1992；20(12)：1436
105 陈同森等．湖南大学学报（自），1994；21(6)：39
106 史慧明等．高等学校化学学报，1984；5(2)：163
107 范蔚全等．岩石矿物及测试，1985；4(1)：70
108 顾丽忠等．浙江工学院学报，1991；(1)：54
109 蒋国新．冶金分析，1993；13(1)：41
110 王东进等．化学试剂，1984；6(3)：139
111 王东进等．分析化学，1988；16(12)：1070
112 丁明玉等．分析试验室，1987；6(4)：22
113 丁明玉等．分析试验室，1988；7(2)：58
114 王献科等．岩矿测试，1990；9(1)：51
115 夏道沛等．冶金分析，1989；9(5)：14
116 陈同森等．理化检验（化），1990；26(3)：159
117 江淑芙等．青岛化工学院学报，1991；12(1)：55
118 齐美玲等．药物分析杂志，1992；12(6)：336
119 王献科等．铁道劳动安全卫生与环保，1993；(3)：219
120 籍志琴等．南昌大学学报（理），1994；18(1)：73
121 王东进等．化学试剂，1983；5(6)：337
122 李金和等．分析化学，1985；13(6)：418
123 李金和等．分析化学，1986；14(8)：587
124 沈含熙等．分析化学，1987；15(2)：101
125 黄桂芳等．冶金分析，1989；9(1)：11
126 李文霞等．矿物岩石，1991；11(4)：112
127 傅佩玉等．冶金分析，1994；14(1)：50

表 17-13 含环糊精等增效剂的显色体系的吸光光度分析法应用示例

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	线性范围	文献
Al	CAS(或 ECR)-β-CD-CTMAB(或 CPB)，同时测 Ga、In	—	—	—	—	1
Ag	phen-溴邻苯三酚红(或曙红)-β-CD-TritonX-100	pH6	635	—	(0～20)μg/25ml	2
	$TPPS_4$-CTMAB-β-CD	—	—	—	—	3
Be	姜黄素-β-CD-TritonX-100(CPB)	—	—	—	—	4
Cd	5-Br-PADAP-尿素-β-CD-CTMAB	—	—	—	—	5
	卟啉类-β-CD 等	—	—	—	—	6
Co	5-Br-PADAP-β-CD	pH=5.0～7.8	585	8.84	(0～15)μg/25ml	7
Cu	四(4-甲氧基 3-磺酸基苯)卟啉-α-CD	pH=7.1～7.3	417	25	(0～2)μg/10.75ml	8
Cr	溴邻苯三酚红-CPB-β-CD-TritonX-100	pH5.4	650	7.8	(0～6)μg/25ml	9
Hg	双硫腙-β-CD	1.2mol·L^{-1}NaOH	555 455	11.6	(0～30)μg/25ml	10
Mo	孔雀绿-SCN^--β-CD-阿拉伯胶	(0.3～0.5)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	625	38	(0～5)μg/25ml	11
Pb	四(对磺基苯)卟啉-phen-β-CD	pH=9.8～11.2	464	28.1	(0～30)μg/50ml	12
Pd	水溶性卟啉-β-CD	—	—	—	—	13
Zn	5-Br-PADAP-尿素-β-CD	—	—	—	—	14
	SCN^--罗丹明 B-β-CD-PVA(或 β-CD-Triton X-100)	—	—	—	—	15
	双硫腙-β-CD-TX－100	—	—	—	—	16

本表参考文献：

1 戚文彬,康继韬. 分析化学,1991;19(11)：1234
2 戚文彬，杨晓奕. 分析测试通报，1992；11(1)：18
3 潘祖亭等. 高等学校化学学报，1993；14(12)：1671
4 何应律等. 分析试验室，1993；12(5)：38；裴世桥等. 岩矿测试，1993；12(2)：113
5 黄辰龙，曹建明等. 温州师院学报（自），1991；98
6 林辉概等. 分析试验室，1992；11(3)：70；黄桂芳等. 地质实验室，1992；8(5)：264；吴彩秉等. 华侨大学学报（自），1992；13(2)：191
7 朱自喻等. 杭州大学学报（自）. 1991；18(2)：198
8 陶宗祥，季涛等. 分析化学，1990；18(5)：465
9 郑启梅，戚文彬等. 冶金分析，1992；12(2)：7
10 张振辉等. 江西大学学报（自），1991；15(1)：7
11 黄辰龙，戚文彬. 分析试验室，1989；8(5)：20
12 朱利中，何晓峰等. 岩矿测试，1990；9(1)：22
13 李志良等. 稀有金属，1992；16(6)：465
14 黄辰龙，王占岳等. 上海环境科学，1992；11(2)：25
15 朱利中，周荣美等. 分析试验室，1990；9(5)：22
16 朱利中，戚文彬等. 杭州大学学报（自），1989；16(3)：296

表 17-14　离子缔合型络合物的吸光光度分析法应用示例

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A：B：C：D)	文献
Ag	碘化物-罗丹明B（水溶）	0.04mol·L^{-1} H_2SO_4 + 0.05mol·$L^{-1}H_3PO_4$	580	12.4	(3～25)μg/50ml	—	1
	phen-荧光桃红-PVA	pH=6.1～6.5	565	6.8	(0～30)μg/25ml	1：2：1	2
	溴邻苯三酚红-phen-明胶	pH6.5	635	5.94	—	—	3
	SCN^--罗丹明B-聚乙烯醇聚氧乙烯醚	0.08mol·L^{-1} H_2SO_4	603	41.7	(0.5～2.0)mg·L^{-1}	—	4
	SCN^--罗丹明B-阿拉伯树胶	0.02mol·L^{-1} H_2SO_4	588	27.3	(0.5～5.0)mg·L^{-1}	—	4
	I^--$SnCl_2$-孔雀石绿-聚乙烯醇（浮选法）	稀HCl	620	270	(0.03～1.6)μg/25ml	—	5
	meso-四(4-磺酸基苯基)卟啉-CTMAB-β-CD	pH>10.5，后酸化	424	52.1	(0～8)μg/25ml	--	6
	邻菲罗啉-邻溴苯三酚红-明胶	pH=4～8	635	6.0	(0.2～1.8)mg·L^{-1}	--	7
As	罗丹明B-砷钼杂多酸-阿拉伯树胶	—	580	19.9	(0～8)μg/25mlAs	1：4	8
	砷锑钼杂多酸-结晶紫(水溶)	0.175mol·L^{-1} H_2SO_4	535	16	(0～4)μg/20ml	—	9
	砷钼酸-结晶紫-聚乙烯醇	—	545	20	(1～6)μg/25ml	B：C=1：3	10
	砷钼杂多酸-乙基紫-PVA	0.028mol·L^{-1} H_2SO_4	550	23.0	(0～6)μg/25ml	A：C=1：3	11
	砷钒钼杂多酸-结晶紫-PVA	(1.2～2.0)ml H_2SO_4 (1mol·L^{-1})	545	21.4	(0～5)μg/25ml	—	12
	砷钼杂多酸-乙基罗丹明B-PVA	0.34mol·L^{-1} H_2SO	589	30.0	(0～5.0)μg/25ml	—	13
	丁基罗丹明B-砷钼杂多酸-PVA_{724}	0.14mol·L^{-1} HNO_3	590	69.0	(0～1.3)μg/25ml	1：7	14
	罗丹明6G-砷钼杂多酸-PVA	0.35mol·L^{-1} H_2SO_4	560	22.1	(0～5)μg/25ml	--	15
Au	碘化钾-丁基罗丹明B-TritonX-100	pH=2.0～3.5	530，610	120	(16～100)μg·L^{-1}	—	16
	曙红-吡咯啶二硫代氨基甲酸钠(聚乙烯醇)	pH=3.5～4.0	545	2.56	(0～50)μg/25ml	—	17
	$SnCl_2$-结晶紫-PVA	稀HCl	545	177	(0～2.5)μg/25mlAu	1：3：5	18
	罗丹明B-SCN^--阿拉伯树胶	0.3mol·L^{-1} H_2SO_4	596	12.3	(0～8)μg/25ml	1：1：4	19
	β,β'-硫二丙腈-硫代米蚩酮	pH4.2	550	—	(0～12)μg/5ml	—	20
	四-(4-磺酸基苯基)卟啉-二苯胍	pH10.2	410	—	(0.1～0.35)μg/25ml	—	21
	$Au(CN)_2^-$-孔雀绿	pH7	635	6.03	—	—	22
	钼酸盐-耐尔蓝-聚乙烯醇	—	595	27.1	(0～16)μg/25ml	—	23
B	苯羧乙酸-孔雀石绿，苯萃取	pH3	637	5.3	(5×10^{-7}～1.5×10^{-5}) mol·L^{-1}	—	24,25
Be	对溴偶氮氯膦-PVA	pH9.3	615	3.15	0～10μg/25mlBe	1：2	26
Bi	碘化钾-罗丹明B(水溶)	(0.3～0.45) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	590	14	(0～15)μg/25ml	--	27
	半二甲酚橙-氯化四苯胂(苯溶)	pH1.5	530	2.3	(0～60)μg/25ml	—	28

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
Bi	罗丹明6G KI-阿拉伯胶	(0.02~0.7)mol·$L^{-1}HNO_3$	560	69.0	(0~10)μg/25ml	1:2	29
	SCN^--孔雀绿$^+$-PVA	(0.01~0.04)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	620	71	(0~20)μg/25mlBi	—	30
	I^--罗丹明B^+-PVA	稀HNO_3	594	23	—	—	31 32
	I^--结晶紫-阿拉伯树胶	pH=2.8~3.5	560	29.3	(0~12.5)μg/25ml	1:5:2	33
	I^--罗丹明6G-PVA	(0.07~0.22)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	564	10.7	(0~10)μg/25ml	1:3	34
	I^--罗丹明B-PVA	0.08mol·L^{-1} HNO_3	580	—	(0~6)μg/50ml	—	35
	I^--乙基紫-阿拉伯树胶	pH=3.0~4.5	540	20.5	(0~8)μg/25mlBi	—	36
	丁基罗丹明B-I^--阿拉伯胶-TritonX-100	0.04mol·L^{-1} H_2SO_4	586	160	(0~100)mg/mlBi	1:2	37
	还原为BiH_3,I^--罗丹明B-阿拉伯树胶	—	595	57.6	(0~0.3)μg·ml^{-1}	—	38
	I^--罗丹明B-聚乙烯醇-Triton X-100	(0.025~0.09)mol·$L^{-1}HNO_3$	605	28.8	(0~10)μg/25ml	1:5:2	39
	I^--乙基紫-阿拉伯胶-聚乙烯醇	pH4.2	560	35.6	(0~12.5)μg/25ml	—	40
Cd	碘化物-磷酸三丁酯-孔雀绿(萃取)	pH=4.5~5.5	635	6.6	(0~10)μg/5ml	—	41
	结晶紫-KI-阿拉伯胶	0.03mol·L^{-1} H_2SO_4	520	21.0	(0~8)μg/25ml	—	42
	乙基紫 KI-PVA	稀H_2SO_4	550	73.0	(0~2)μg/25ml	—	43
	I^--罗丹明B-PVA	(0.002~0.024)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	612	150	(0~10)μg/10mlCd	—	44
	I^--乙基罗丹明B-PVA	0.14mol·L^{-1} H_2SO_4	605	130	(0.1~1.5)μg/25mlCd	—	45
	乙基紫-I^-—阿拉伯树胶	0.04mol·L^{-1} HCl	540	28.1	(0.5~5.0)μg/25mlCd	—	46
	吡罗红G-I^--明胶	pH4	575	12	(0~10)μg/25mlCd	—	47 48
	I^--罗丹明6G-阿拉伯胶	0.08mol·L^{-1} H_2SO_4	560	101	(0~60)ng·ml^{-1}	—	49
	I^--丁基罗丹明B(BRB)-PVA	(0.06~0.12)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	620	94	(0~1.5)μg/25ml	—	50
	I^--丁基罗丹明B-PVA	0.1mol·L^{-1} H_2SO_4	600	114	(0~1.5)μg/25ml	1:2	51
	I^--BRB—阿拉伯胶-OP	稀H_2SO_4	605	190	(0~1.5)μg/25ml	1:4:2	52
	I^--BRB-PVA	0.1mol·L^{-1} H_2SO_4	600	114	(0~1.5)μg/25ml	—	53
	I^--$SnCl_2$-孔雀绿-PVA(通气浮选,富集)	稀HCl	620	2100	(0~1.2)μg/25ml	—	54
	I^--维多利亚蓝B-PVA	稀H_2SO_4	580	37.0	(0~4)μg/25ml	—	55
	I^--罗丹明6G-PVA-124	0.028mol·L^{-1} H_2SO_4	560	9.5	(0~10)μg/25ml	—	56
Co	硫氰酸盐-碱性三苯甲烷染料(保护胶)	—	—	4.2~16	(0~12)μg/25ml	A:D=1:4	57
	硫氰酸盐-亮绿(存在阿拉伯胶)	pH20	660	14.7	(0~15)μg/25ml	1:4:2	58
	5-Br-PADAP-β-环糊精	pH9	584	9.43	(0~0.60)mg·L^{-1}	—	59
Cu	新铜试剂-甲基橙(萃取)	pH=6~7	420	—	—	—	60
	SCN^--结晶紫-PVA-阿拉伯胶	0.12mol·L^{-1} H_2SO_4	555	48	(0~6)μg/25mlCu	—	61
	罗丹明B-SCN^--明胶	pH3.6	610	5.0	(0~10)μg/25ml	—	62
	$Cu(OH)_2$-PVA	pH10	740	—	—	—	63
	Cu(I)-SCN^--罗丹明B-PVA	H_2SO_4-H_3PO_4	594	17.0	(0~6.25)μg/25ml	1:3:2	64
	SCN^--罗丹明B	0.24mol·L^{-1} H_2SO_4	606	15	(0~5.00)μg/25ml	1:2	65
	氢氧化铜-聚乙烯醇	pH12	635	—	(0~8)μg/50ml	—	66
	Cu(I)-SCN^--罗丹明B-明胶-聚乙醇辛基苯基醚	0.12mol·L^{-1} H_2SO_4	595	20	(0~5.0)μg/25ml	—	67

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10⁴	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Cu	间磺酸偶氮氯膦-聚乙烯吡咯烷酮	pH4.5		2.54	(0~15)μg/25ml	—	68
Fe	SCN^--结晶紫-PVA	(0.04~0.12)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	550	107	(0~2.5)μg/25mlFe	—	69 70
	结晶紫-SCN^--阿拉伯树胶	pH0.9(H_2SO_4)	535	56	—	—	71
	SCN^--结晶紫-阿拉伯胶，同时比较了其他5种碱性染料	(0.03~0.1)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	535	56.0	—	—	72
	SCN^--结晶紫-阿拉伯胶	0.04mol·L^{-1} H_2SO_4	530	25	(0~2.8)μg/25ml	—	73
	SCN^--Rh6G(RhB, ERhB, BRhB))-阿拉伯胶	稀H_2SO_4	510	61.4	—	—	74
	SCN-结晶紫-PVA	(0.035~0.045)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	540	60.7	(0~2.35)μg/25ml	—	75
	phen-四碘荧光素-聚乙二醇	pH5.4	566	10.0	—	1∶3∶2	76
	硫氰酸钾-邻菲罗啉-Tween-80	—	525	20.0	(0~20)μg/25ml	—	77
	SCN^--结晶紫	—	530	35	(0.5~2.5)μg/25ml	—	78
	1,10-菲罗啉-甲基橙(1,2-二氯乙烷萃取)	—	420	5.0	(0~20)μg/25ml	1∶3∶2	79
Ge	结晶紫-锗钼杂多酸-OP	(0.11~0.14)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	545	15	(1.25~7.5)μg/25ml	—	80
	丁基罗丹明B-锗钼杂多酸-PVA	(0.2~1.2)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	588	19.0	(0~6)μg/25ml	1∶4	81
	槲皮素-阿拉伯胶	(1.35~3.75)mol·L^{-1}HCl	468	10.3	(0~5)μg/10mlGe	1∶3	82
	结晶紫-锗钨酸-PVA	0.13mol·L^{-1} H_2SO_4	545	11.0	(0~3.2×10^{-6})mol·L^{-1}	3∶1	83
	苯基荧光酮-CTMAB-聚乙醇	HCl	506	17.0	(0~18)μg/50ml	—	84
	耐尔蓝(NB)-12-钼锗酸-聚乙烯醇	pH=1.9~3.0	605	90.8	(0~4.0)μg/25ml	1∶9	85
Hf	SCN^--CN^--结晶紫-PVA	(0.24~0.32)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	550	86	(0.5~10)μg/25mlHf	—	86
Hg	碘化钾-罗丹明6G(明胶存在)	pH4	570	7.0	(0~12)μg/50ml	—	87
	SCN^--丁基罗丹明B-PVA	pH4.5	610	11	(0~20)μg/25mlHg	—	88
	I^--罗丹明6G-PVA	pH4	565	7.8	(6~27.5)μg/25mlHg	—	89
	I^--乙基罗丹明B-PVA	0.12mol·L^{-1} H_2SO_4	605	114	(0~2.5)μg/25mlHg	—	90
	SCN^--罗丹明B-PVA	稀H_2SO_4	620	91.9	(0~6)μg/25ml	—	91
	SCN^--罗丹明B-明胶	0.024mol·L^{-1} HCl	596	83.7	(0.5~3.5)μg/25ml	1∶5	92
	I^--乙基紫-阿拉伯胶	pH4	540	25.0	(1~8)μg/25ml	4∶4∶2	93
	SCN^--结晶紫-阿拉伯树胶，乳化剂OP	(0.06~0.07)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	535	115	(0~2.0)μg/25ml	—	94
I	碘-碘离子-孔雀绿(苯取)	0.37mol·L^{-1} H_2SO_4	640	27.4	(0~7)μg/10mlIO_3^-	—	95
	5-Br-PADAP-IO_4^--SCN^-	(0.05~0.10)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	554	6.8	<17.5μg/10ml	1∶1∶1	96
	I_3^--罗丹明B-聚乙烯醇	酸性	588	54.7	(0~6)μg/25ml	1∶1	97
In	碘-乙基紫(苯萃取)	1.5mol·L^{-1} H_2SO_4	619	9.53	(0~10)μg/10ml	1∶3∶1	98
	结晶紫-SCN^--PVA	(0.06~0.16)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	560	80.0	(0.1~10)μg/25ml	—	99
	SCN^--孔雀绿-PVA	(0.04~0.08)mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	600	29	(0~25)μg/50mlIn	—	100
	SCN^--结晶紫(孔雀绿)-阿拉伯胶			21~57	—	1∶6∶3	101
Ir	$SnCl_3^-$-罗丹明B-PVA	2mol·L^{-1}HCl	585	420	(0~0.2)μg/25mlIr	—	102
	结晶紫-$SnCl_2$-PVA	(0.31~0.35)mol·L^{-1}HCl	540	125.0	(0~4)μg/25ml	3∶3∶1	103
	孔雀绿-$SnCl_2$-阿拉伯胶	1.2mol·L^{-1}HCl	600	14.0	(0~20)μg/25ml		104
K	冠醚-双苦胺(苯取)	pH=10~11					105
	二苯并-18-冠-6-溴甲酚绿(苯取)	pH=3.9±0.1	410	0.456	0~5mg·L^{-1}	—	106

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10⁴	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Mo	耐尔蓝-PVA	(0.5~1.1) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	630	18.0	(0~30)μg/25ml	—	107
	乙基紫-SCN^--PVA	(0.45~0.63) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	580	90.0	(0~3)μg/25ml	1∶12	108
	SCN^--维多利亚蓝 4R-PVA	(0.48~0.72) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	575	13	—	1∶5∶2	109
	溴连苯三酚红-乙基紫-PVA	pH=2.3~2.8	535	17.0	(0~0.16)μg/25mlMo	1∶1∶2	110
	SCN^--乙基罗丹明 B-PVA (Cu^{2+}催化)	1.3mol·L^{-1} HCl	580	360	(0~0.3)μg/25ml	—	111
	SCN^--罗丹明 B-PVA_{124}[V(Ⅴ)催化]	1.4mol·L^{-1} HCl	588	200	(0~8)μg/25ml	—	112
	SCN^--罗丹明 B-阿拉伯胶	(0.18~0.72) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	588	201	(0~2)μg/25ml	—	113
	磷钨钼蓝	(0.05~0.20) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	500	0.13	(0~0.20)mg·ml^{-1}	—	114
	磷钨钼钒杂多蓝	(0.25~0.70) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	700	—	(0~8)mg/25ml	1∶1∶1∶1	115
	SCN^--结晶紫-溴邻苯三酚红-Tween-80	(0.15~0.35) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	580	310	(0~5.0)μg/50ml	1∶6∶3	116
	CNS^--乙基紫-溴邻苯三酚红-Tween-80	0.24mol·L^{-1} H_2SO_4	565	350	(0~2.5)μg/50ml	1∶6∶3	117
	氮三乙酸-溴邻苯三酚红-CTMAB	pH2.5	600	7.27	(0~1.0)mg·L^{-1}	1∶1∶2∶4	118
	3,5-DiBr-PADAP-盐酸羟胺-SDS	pH=2.4~3.5	618	4.8	(0~25)μg/10ml	1∶1∶1	119
	溴邻苯三酚红-CTMAB-β-环糊精-TritonX-100	pH = 4.40 ~ 4.70	600	8.00	(0~5)μg/25ml	—	120
Na	苯并-15-冠-5-溴甲酚绿(萃取)	pH3.1	410	0.5	(0~15)μg/5ml	1∶1∶1	121
Nb	结晶紫-SCN^--PVA	(0.1~0.14) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	640	130.0	(0~5)μg/25ml	—	122
	铌钼杂多酸-丁基罗丹明 B-PVA	(0.4~0.7) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	585	75.0	(0~4)μg/25ml	—	123
	耐尔蓝-铌钼杂多酸-PVA_{124}	(1.1~1.8) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	615	246	(0~1.2)μg/25ml	3∶1	124
	钼酸铵-结晶紫-聚乙烯醇	—	640	85.2	(0~5)μg/25ml	—	125
	钼酸铵-罗丹明 B-聚乙烯醇	(0.85~1.15) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	580	108	(0~3)μg/25ml	—	126
Os(Ⅳ)	SCN^--乙基紫-PVA	0.48mol·L^{-1} H_2SO_4	560	105	(0~10)μg/25mlOs	—	127
	$SnCl_3^-$-孔雀绿-PVA	(0.3~0.5) mol·L^{-1}HCl	690	160	(0~4)μg/25mlOs	—	128
	$SnCl_2$-结晶紫-聚乙烯醇	≤0.33mol·L^{-1}HCl	555	152	—	—	129
	$SnCl_2$-亮绿-PVA	2.5mol·L^{-1}盐酸	434	560	(0.1~0.7)μg/25ml	—	130
	钼酸铵-罗丹明 B-PVA	—	570	262	(0~1.2)μg/25ml	—	131
P	磷锑钼酸-孔雀绿-聚乙烯醇	(0.08~0.18) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	600		(0~5)μg/50ml	1∶2	132
	磷钒钼酸-罗丹明 B-聚乙烯醇	0.25mol·L^{-1} H_2SO_4	585	21.3	(0~5)μg/50ml	—	133
	磷钒钼黄-$SnCl_2$/(萃取)	—	670	—	—	—	134
	磷-钼-铪蓝(水溶)	(0.1~0.8) mol·L^{-1}硝硫酸	720	2.3	(0~50)μg/50ml	1∶1∶11	135
	磷钼酸-乙基紫-聚乙烯醇	0.32mol·L^{-1} H_2SO_4	610	8.9	(0~8.0)μg/25ml		136
	磷钼酸-罗丹明 B-聚乙烯醇	(0.12~0.19) mol·L^{-1}硝硫酸	590	17.8	(0~5)μg/50ml	1∶4	137
	磷钼铬紫-结晶紫-聚乙烯醇	0.02mol·L^{-1} H_2SO_4	550	13	—	1∶2	138
	磷锑钼酸-结晶紫-聚乙烯醇	0.2mol·L^{-1} H_2SO_4	550	12.9	(0.1~1.5)μg/25ml	—	139
	磷锑钼蓝-罗丹明 B-聚乙烯醇	—	585	10.9	(0.5~5)μg/100ml	—	140

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
P	磷锑钼酸-孔雀绿-非离子活性剂	(0.39～0.54) mol·L^{-1}	620	10.7	(0～4)μg/26ml	—	141
	磷钼酸-结晶紫(萃取)	(0.50～1.10) mol·$L^{-1}HNO_3$	592	—	(0.005～0.1)μg/2ml	—	142
	罗丹明B-磷钼钒杂多酸-OP	0.59mol·L^{-1} H_2SO_4	568	16.7	—	—	143
	乙基紫-钼酸铵-乳化剂OP	< 0.036mol·$L^{-1}H_2SO_4$	553	22.8	(0～3)μg/25ml	—	144
	甲基紫-磷钼杂多酸-PVA	(0.28～0.4) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	655	7.2	(0～6)μg/25ml	1:2	145
	乙基罗丹明B-磷钼杂多酸-PVA	0.56mol·L^{-1} HNO_3	586	32	(0～1.5)μg/25mlP	1:4	146
	丁基罗丹明B-磷钒钼蓝-PVA	0.3mol·L^{-1} H_2SO_4	584	26	(0～1.8)μg/25mlP	—	147
	孔雀绿-磷钼杂多酸-PVA	0.7mol·L^{-1} H_2SO_4	640	12	(0～5)μg/25mlP	—	148 149
	结晶紫-磷钼杂多酸-明胶	(0.125～0.25) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	555	22	—		150
	丁基罗丹明B-磷钼杂多酸-PVA	0.15mol·L^{-1} HNO_3	588	110	—	1:4和1:14	151
	罗丹明B-磷锑钼杂多酸-PVA_{124}	0.9mol·L^{-1} HCl	576	14.0	(0～60)μg/50ml	—	152
	孔雀绿-磷钼杂多酸-PVA	—	—	—	—	—	153
	罗丹明B-磷钼钡杂多酸-PVA	—	590	17.0	—	—	154
	磷钼钒酸-2-(二甲丙氨基-3-甲基-二甲氨基偶氮苯)-1,3,4-噻二唑	—	590～600	28	(0～1.4)μg/10ml	—	155
	磷钼杂多酸-孔雀绿-Triton X-100	0.48mol·L^{-1} H_2SO_4	630	9.03	(0～2.0)μg/25ml	—	156
	磷钼杂多酸-孔雀绿-聚乙二醇辛基苯基醚	0.16mol·L^{-1} H_2SO_4	632	—	(0～5)μg/25ml	—	157
	磷钼杂多酸-孔雀绿-聚乙烯醇	0.25mol·L^{-1} H_2SO_4	640	7.0	(0～7)μg/50ml	—	158
	钼酸铵-孔雀绿	0.18mol·L^{-1} H_2SO_4	665	9.5	(0～2.5)μg/50ml	—	159
	磷钼酸-乙基罗丹明	0.64mol·L^{-1} HNO_3	586	22	(0～2.0)μg/25ml	—	160
	磷钨钼-罗丹明B-PVA		580	13	(0～9.0)μg/100ml	—	161
	磷钼蓝-罗丹明B-聚乙烯醇	—	585	15.5	(0～8)μg/50ml	—	162
	磷钼杂多酸-孔雀绿-PVA	0.4mol·L^{-1} H_2SO_4	640	10	(0～7)μg/25ml	—	163
	磷钼酸-三乙胺	HNO_3pH1	370	21	(0.3～6.0)μg/25ml	—	164
Pb	碘化钾-结晶紫(动物胶存在)	(0.016～0.064) mol·L^{-1}HCl	540	13.4	(0～25)μg/25ml	A:C=1:2	165
	碘化钾-乙基紫-聚乙烯醇	0.004mol·L^{-1} H_2SO_4	560	78	(0～4)μg/25ml	—	166
	碘化钾-结晶紫-明胶	0.04mol·L^{-1} HCl	540	5.5	(0～12)μg/15ml	—	167
	丁基罗丹明B-I^--阿拉伯胶-TritonX-100	pH=1.3～1.8 H_2SO_4	605	62	(0～10)μg/50mlPb	—	168
	罗丹明B-I^--明胶-TritonX-100	酸性	600	21	(0～10)μg/25mlPb	—	169
	乙基罗丹明B-I^--PVA-阿拉伯胶	0.32mol·L^{-1} H_3PO_4	605	100	(0.1～30)μg/25ml	—	170
	I^--结晶紫-阿拉伯胶-PVA	pH=1.8～2.0	530	14.0	(0～20)μg/25ml	—	171
	I^--结晶紫-阿拉伯胶-PVA	pH=1.5～2.0	530	13.4	(0～12)μg/25ml	—	172
Pd	碘化钾-丁基罗丹明B-TritonX-100	pH = 1.7 ～ 2.0H_3PO_4	588	25	(8～140)ng·ml^{-1}	$(BRB^+)_2(PdI_4)^{2-}$	173
	SCN-罗丹明B-PVA	(0.001～0.002) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	589	29.8	(0～8)μg/25ml	—	174
	卟啉-环糊精	pH4.5	414	26	(0～10)μg/25ml	—	175
	phen-Cadion HSC-Tween-80	pH9.5	518	9.4	(0～10)μg/25ml	—	176

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10^4	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Pd	孔雀绿-$SnCl_2$-PVA	(0.27～0.37) mol·L^{-1}HCl	700	230.0	(0～1.0)μg/25ml	1∶1∶4	177
	结晶紫-$SnCl_2$-PVA	(0.33～0.35) mol·L^{-1}HCl	550	370. 5	(0.1～1.0)μg/25ml	1∶2∶2	178
Pt	孔雀绿-PtX_2·$(SnX_3)_2$-聚乙烯醇	(0.3～0.6) mol·L^{-1}HCl	600, 650	14.4, 16.7	(0～10)μg/25ml	B∶C=2∶1	179
	罗丹明B-$SnCl_2$-PVA	(0.08～3)mol·L^{-1}HCl	600	10.0	(0～18)μg/25ml	1∶4	180
	$SnCl_2$-结晶紫-PVA	(0.31～0.35) mol·L^{-1}HCl	540	56	(0～6)μg/25mlPt	—	181
	$SnCl_2$-丁基罗丹明-PVA	1.7mol·L^{-1}HCl	570	29.6	(0～10)μg/25ml	—	182
	SCN^--罗丹明B-阿拉伯树胶	3.6×10^{-2}mol·L^{-1}HCl	584	161	(0～1.0)μg/25ml	—	183
	$SnCl_3^-$-MG^+	0.36mol·L^{-1} HCl	621	45	(0.5～6)μg/10ml	—	184
	钼酸盐-罗丹明B-聚乙烯醇	—	570	68.3	(0～3.5)μg/25ml	A∶C=1∶2	185
	钼酸铵-丁基罗丹明B-聚乙烯醇	—	570	92.6	(0～3.0)μg/25ml	—	186
	$SnCl_2$-丁基罗丹明B-阿拉伯胶-OP	1.2mol·L^{-1} HCl	580	179	—	—	187
Rh	维多利亚蓝B-$SnCl_2$-阿拉伯胶	(0.24～0.48) mol·L^{-1}HCl	585	130.0	(0～1.5)μg/25ml	--	188
	维多利亚蓝B-抗坏血酸-明胶	(0.12～0.36) mol·L^{-1}HCl	590	8.19	(0～30)μg/25ml	1∶6∶1	189
	$SnCl_2$-罗丹明B-PVA	0.6mol·L^{-1}HCl	593	137	(0～1.6)μg/25mlRh	—	190
	$SnCl_2$-丁基罗丹明B-明胶	(1.3～1.9) mol·L^{-1}HCl	585	16.0	(0～5)μg/25ml	1∶3	191
	$SnCl_2$-罗丹明6G-明胶	(1.5～2.0) mol·L^{-1}HCl	558	15.2	(0～12)μg/25ml	—	192
	钼酸盐-丁基罗丹明B-聚乙烯醇	1.5mol·L^{-1} $HClO_4$	570	32.2	(0～8)μg/25ml	A∶C=1∶4	193
	钼酸盐-耐尔盐-聚乙烯醇	--	595		(0～10)μg/25ml	A∶C=1∶4	194
	罗丹明6G-SCN^--阿拉伯胶	pH=3～3.5	560	8.5	(0～5)μg/25ml	1∶3	195
	孔雀绿-$SnCl_2$-PVA	(0.32～0.5) mol·L^{-1}HCl	700	210.0	(0～1.6)μg/25ml	1∶49∶49	196
	$SnCl_2$-结晶紫-PVA	(0.33～0.35) mol·L^{-1}HCl	550	110	(0.2～2.8)μg/25mlRu	--	197
	SCN^--乙基紫-PVA	0.42mol·L^{-1} H_2SO_4	560	110	(0～5)μg/25ml	--	198
	钼酸盐-罗丹明B-PVA	--	570	90.5	(0～1.2)μg/25ml	—	199
Sb(Ⅲ)	I^--乙基罗丹明B-PVA	0.06mol·L^{-1} H_2SO_4	605	70	(0.1～2.5)μg/25mlSb	—	200
	丁基罗丹明B-I^--阿拉伯胶-TritonX-100	稀H_2SO_4	605	73.3	(0～1.2)μg/25mlSb	—	201
Sc	5-Br-PADAP-PVA	pH6.3	560	4.5	(0～50)μg/25mlSc	1∶1	202
	3-(4-甲酰基苯偶氮)4,5-二羟基-2,7-萘磺酸缩合物-PVA	pH7.4	590	5.28	(0～11)μg/25ml	—	203
Se	硫氢酸盐-罗丹明B-Tween-20	pH3.9	594	200	(0～2)μg/25ml	1∶6∶2	204
	KI-溴化十六烷基三甲胺-Tween-80	—	350	14.6	(0～4)μg·ml^{-1}	—	205
	硫氢酸钾-罗丹明B-明胶-OP	pH3.8	606	79	(0～3)μg/25ml	1∶6∶4	206
	硫氢酸盐-乙基紫-阿拉伯树胶	(0.50～0.58) mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	620	40	(0～4.0)μg/25ml	—	207
	丁基罗丹明B-SCN^--阿拉伯胶	pH=3.2～3.6	590	13.5	(0～7)μg/25ml	1∶2	208
Si	硅钒钼蓝-丁基罗丹明B-动物胶	(0.05～0.125) mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	568	14	(0～15)μg/100ml SiO_2	—	209
	硅钼酸-甲基绿-阿拉伯胶	1.15mol·L^{-1} H_2SO_4	660	23	(2～15)μg/50ml	Si∶甲基绿=1∶1	210
	结晶紫-硅钼杂多酸	pH1.4	555	14.0	(0～3.0)μg/25ml	—	211
	罗丹明B-硅钼钒杂多酸-乳化剂OP-明胶	1.42mol·L^{-1} H_2SO_4	565	15.3	(0～4.5)μg/25ml	—	212

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	ε/10⁴	测定范围	组成比(A∶B∶C∶D)	文献
Si	乙基罗丹明B-硅钼杂多酸-PVA	pH1.5	584	34	—	1∶4	213
	罗丹明B-硅钼杂多酸-阿拉伯胶	pH2.6	579	18	(0～5)μg/25mlSi	1∶4	214
	罗丹明B-硅钒钼蓝-阿拉伯树胶	酸性	595	110	(0～0.7)μg/25mlSi	—	215
	甲基绿-硅钼杂多酸-阿拉伯树胶	—	660	21.6	—	—	216
	丁基罗丹明B-硅钼杂多酸-PVA	pH0.74H_2SO_4	580	11.0	(0～14)μg/100ml	—	217
	硅钼黄-罗丹明B-阿拉伯树胶	1.7mol·L^{-1} H_2SO_4	560	0.41	0.010%～0.100%	—	218
	硅钼杂多酸-罗丹明B-明胶-PVA	HNO_3	585	45	(0～3.5)μg/50ml	—	219
Sn	乙基紫-SCN^--PVA-阿拉伯胶	(0.3～0.6)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	580	93.0	(0～7.5)μg/25ml	1∶15	220
	SCN^--结晶紫-聚乙烯醇	(0.01～0.04)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	550	25	(0～10)μg/50ml	—	221
Ta(Ⅴ)	丁基紫-SCN-PVA	0.48mol·L^{-1} H_2SO_4	560	190	(0～0.5)μg/25ml	—	222
	丁基罗丹明B-PVA-钽钼酸	0.29mol·L^{-1} H_2SO_4	588	36.2	(0～5)μg/25ml	Ta∶Mo∶BRhB=1∶6∶3	223
	钼酸根-罗丹明B-聚乙烯醇	(0.72～1.1)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	580	136～200	(0～3)μg/25ml	—	224
	亚甲基蓝等多种碱性染料-OP-PVA	—			—	1∶1～1∶7	225
Te	罗丹明B-KI-PVA	(0.64～1.28)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	600	16.5	(0～2.0)μg/25ml	—	226
	碲钼杂多酸-耐尔蓝-PVA	0.05mol·L^{-1} H_2SO_4	600	31	(0～12)μg/25ml	—	227
		—	570	32	(0～16)μg/25ml	1∶7∶2	228
	孔雀绿-阿拉伯树胶	—	660	56	(0～15)μg/25ml	—	229
		—	—	—	—	—	230
Ti	氯磺酚S-PVA	pH2.5	660	2.4	(0～25)μg/25mlTi	—	231
	H_2O_2-XO	pH3～3.5	510	—	(1～10)μg/10ml	1∶1∶1	232
Tl(Ⅲ)	罗丹明B^--$TlBr_4^-$-PVA	(0.2～0.4)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	588	4.2	(0～62.5)μg/25mlTl	—	233
	SCN^--乙基紫-PVA	(0.12～0.36)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	560	112	(0～10)μg/25ml	—	234
	KI-孔雀石绿等三种(灿烂绿、碘绿)-阿拉伯树胶	H_3PO_4	650	92.0	(0～4)μg/25ml	—	235
	KI-罗丹明B-聚乙烯醇(罗丹明6G等4种)	H_3PO_4	585	70.3	(0～2)μg/25ml	—	236
U	苯甲酸-乙基紫(萃取)	pH—3.42～4.18	602	46	(0.2～3)μg/25ml	U∶乙基紫=1∶1	237
	苦杏仁酸-乙基紫-PVA	—	595	14.0	(0.1～0.75)μg·ml^{-1}	—	238
	SCN^--乙基紫-PVA	—	550	580	(0～2.5)μg/25ml	—	239
	5-Br-PADAP-NaF-CPB	pH4.9	580	7.4	—	1∶1∶4∶8	240
	SCN^--维多利亚蓝4R-OP-阿拉伯树胶	(0.08～0.12)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	580	78	(0.04～0.4)μg·ml^{-1}	—	241
V	丁基罗丹明B-磷钼杂多酸-乳化剂	—	585	13	(1～12)μg/100ml	4∶1	242
	磷钼钒酸-耐尔蓝(水溶性)	(0.45～0.65)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	630	13	(0～10)μg/50mlV_2O_5	1∶4	243
	磷钼酸-罗丹明B-(+$SnCl_2$)	—	585	28	—	1∶5	244
	磷钼酸-罗丹明B-聚乙烯醇	0.5mol·L^{-1} H_2SO_4	586	28	—	1∶4(V^{5+})	245
	PAR-乙基紫-PVA	稀H_2SO_4	580	28.7	(0～3)μg/25mlV	—	246
	SCN^--孔雀绿-PVA	(0.01～0.06)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	600	15.8	(0～30)μg/25mlV	—	247
	孔雀绿-磷钒钼杂多酸-PVA	(0.125～0.5)mol·$L^{-1}H_2SO_4$	615	6.88	(0～14)μg/25mlV	—	248
	结晶紫-SCN^--阿拉伯树胶	弱酸性	530	25.5	(0～5)μg/25mlV	1∶3∶4	249
	磷钨钒酸-亚铁还原	酸性	500	0.06	(0～800)μg/50ml	—	250

续表

元素(A)	体系(B-C-D)	测定条件	λ_{max}/nm	$\varepsilon/10^4$	测定范围	组成比(A:B:C:D)	文献
V	磷钨钒杂多酸	—	436	0.13	—	—	251
	H_2O_2-2-(2-噻吩偶氮)-5-二乙氨基酚	pH=5.6~6.0	600	5.1	(1~40)μg/25ml	1:1:1	252
	H_2O_2-5-Br-PADAP-Tween-80	pH=2~5.8	590	6.3	(2.5~35)μg/50ml	—	253
	H_2O_2-PAR	pH=0.15~4	540	1.4	—	—	254
	磷钨钼钒杂多蓝	(0.70~1.0) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	740	—	(0~3.0)mg/25ml	—	255
W	坚辛绿-硫氰酸盐(萃取)	(3~4)mol·L^{-1}HCl	630	5.8	(0~15)μg/50mlWO_3	1:1:1	256
	结晶紫-SCN^--明胶	0.05mol·L^{-1} H_3PO_4	540	41	(0~11)μg/25mlW	1:2:5	257
	SCN^--乙基罗丹明B-PVA	2.2mol·L^{-1} HCl	585	190	(0.1~1.5)μg/25ml	—	258
	结晶紫-磷钨钼杂多酸-PVA	(0.51~0.55) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	570	6.42	(0~45)μg/25mlW	1:4	259
Y	偶氮溴膦-PSN-PVA	0.08mol·L^{-1} HCl	712	9.45	(7~20)μg/25ml	1:3	260
Zn	硫氰酸根-亮绿(水溶)	0.13mol·L^{-1} H_2SO_4	610	17.7	(0~15)μg/25ml	1:4:2	261
	硫氰酸根-维多利亚蓝(阿拉伯胶)	(0.25~0.37) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	575	12.5	(0~15)μg/25ml	1:2	262
	结晶紫-SCN^--PVA	(0.05~0.25) mol·$L^{-1}H_2SO_4$	530	12.4	(1~10)μg/25ml	1:2	263
	罗丹明6G-SCN^--PVA	0.03mol·L^{-1} H_2SO_4	505	18.0	(0~10)μg/25ml	—	264
	结晶紫-SCN^--PVA	1.2mol·L^{-1} H_3PO_4	540	13.5	—	—	265
	罗丹明-SCN^--PVA	1.1mol·L^{-1}HCl	607	260	(0~0.5)μg/25mlZn	1:30	266
	SCN^--罗丹明B-阿拉伯胶		596	168	(0~0.4)μg/25ml	1:5	267
	SCN^--结晶紫-Tween-80	0.08mol·L^{-1} H_2SO_4	540	23.5	(0~9)μg/25ml	—	268
	SCN^--结晶紫	1.2mol·L^{-1} HCl	540	12.8	(0~0.4)μg·ml^{-1}	—	269
	SCN^--丁基罗丹明B	pH3	600	31	(0.2~10)μg/25ml	—	270
	酸蓝6B-喹啉-CTMAB	pH=8.2~9.5	600	11	—	1:2:3:6	271
	SCN^--结晶紫-聚乙烯醇	—	550	19.2	(0~4)μg/25ml	—	272
	PAN-聚乙烯醇	pH=9.2~10.2	570	4.2	(0~30)μg/25ml	1:2	273
	5-Br-PADAP-Tween-80-β-环糊精	pH5.6	558	13.2	(0~0.48)mg·L^{-1}	—	274
	m-Br-$TPPS_4$-β-CD	pH9.60	425	45.7	(0~5)μg/25ml	—	275

本表参考文献：

1 吴太白等. 冶金分析, 1984; 4(5): 13
2 周宗帧等. 广东工学院学报, 1990; 7(3): 33
3 周宗帧等. 贵金属, 1989; 10(2): 41
4 李士和等. 化学试剂, 1992; 14(2): 68
5 张昇晖等. 化学试剂, 1992; 14(4): 239
6 赵　晔等. 高等学校化学学报, 1993; 14(12): 1671
7 左良吉. 辽宁冶金, 1994; (6): 40
8 刘长松等. 山西大学学报(自), 1989; 12(4): 444
9 刘明清等. 湖南师范大学学报(自), 1983; (2): 21
10 刘全翰等. 环境化学, 1983; 2(5): 45
11 赵希珠等. 环境化学, 1987; 6(5): 70
12 蒋念琴等. 化学试剂, 1987; 9(3): 175
13 赵希珠等. 分析化学, 1987; 15(7): 625
14 张红琴等. 分析化学, 1990; 18(8): 710
15 王明雄等. 痕量分析, 1990; (3,4): 101
16 熊云祥等. 化学通报, 1984; (7): 14
17 范存忠. 分析化学, 1984; 12(10): 919
18 赵敏政等. 分析试验室, 1989; 8(5): 22
19 许生杰, 白凤有. 分析试验室, 1991; 10(2): 18
20 刘树庭. 黄　金, 1993; 14(1): 52
21 黄桂芳等. 分析试验室, 1994; 13(1): 42
22 罗明标. 黄　金, 1994; 15(9): 51
23 李祖碧等. 分析试验室, 1994; 13(6): 24
24 吴天龙等. 理化检验(化), 1992; 28(3): 164
25 吴天龙等. 海湖盐与化工, 1992; (2): 46
26 宋现来等. 分析试验室, 1989; 8(5): 22
27 徐一戎等. 北京大学学报(自), 1990; 26(2): 160
28 徐一戎等. 化学试剂, 1989; 11(5): 257
29 徐勉懿等. 分析化学, 1988; 16(4): 363
30 赵琦华等. 冶金分析, 1989; 9(5): 11
31 余定志. 冶金分析, 1988; 8(5): 18
32 印　德. 四川冶金, 1988; 10(3): 74
33 耿柳弟. 湖南有色金属, 1991; 7(3): 176
34 张桂恩, 程定玺, 冯素岭. 冶金分析, 1991; 11(2): 50
35 印德俊. 冶金分析, 1991; 11(2): 57
36 王宗花等. 岩矿测试, 1988; 7(3): 187
37 李晓明等. 分析化学, 1988; 16(9): 797
38 毛陆原等. 郑州大学学报(自), 1993; 25(3): 60
39 金　谷等. 中国科学技术大学学报, 1992; 22(2): 237
40 耿柳弟等. 冶金分析, 1992; 12(6): 43
41 张桂恩. 冶金分析, 1985; 5(1): 18
42 吕　伟等. 环境化学, 1987; 6(3): 22

43 揭 念等. 分析化学, 1988; 16(5): 431
44 张振辉. 江西大学学报(自), 1988; 12(3): 91
45 许生杰等. 分析试验室, 1989; 8(1): 1
46 王宗花等. 分析试验室, 1988; 7(12): 35
47 刘道杰, 孙爱玲. 环境与健康杂志, 1989; 6(4): 19
48 刘道杰, 孙爱玲. 中国环境监测, 1989; 5(4): 11
49 徐勉懿, 潘祖亭等. 环境化学, 1990; 9(5): 57
50 侯 明, 曾国平. 化工环保, 1991; 11(3): 165
51 张路端, 张成孝等. 冶金分析, 1991; 11(6): 7
52 刘树深. 环境与开发, 1991; 6(4): 36
53 张路端, 张成孝等. 干旱环境监测, 1992; 6(1): 3
54 陈显堂, 张 辉等. 环境科学与技术, 1991; (1): 29
55 孙嘉彦, 吴建华, 朱美华. 化工环保, 1991; 11(2): 107
56 张桂恩等. 河南师范大学学报(自), 1992; 20(3): 59
57 詹才清, 刘绍璞. 化学试剂, 1983; 5(3): 177
58 何应律, 黄德贵. 分析化学, 1984; 12(5): 389
59 苏剑雄. 华侨大学学报(自), 1992; 13(3): 328
60 刘顺华. 理化检验, 1985; 21(6): 355
61 李祖碧, 徐其亨. 冶金分析, 1989; 9(6): 12
62 杨季良. 分析试验室, 1990; 9(1): 69
63 程传煊, 苏英卓, 李爱民. 分析化学, 1991; 19(1): 55
64 赫春香, 陈连山. 辽宁师范大学学报(自), 1990; (4): 26
65 张树成等. 冶金分析, 1992; 12(6): 4
66 张 钦. 冶金分析, 1993; 13(1): 40
67 张树成等. 分析试验室, 1994; 13(2): 31
68 孟予建等. 湿法冶金, 1995; (1): 44
69 李祖碧, 徐其亨. 分析化学, 1989; 17(5): 453
70 李祖碧, 徐其亨. 分析化学, 1989; 17(2): 395
71 刘忠芳等. 西南师范大学学报, 1989; 14(4): 105
72 刘绍璞, 刘忠芳, 李念民. 化学试剂, 1991; 13(4): 240
73 江淑芙, 沈 伟等. 理化检验(化), 1991; 27(2): 104
74 刘忠芳, 刘绍璞, 曹 慧. 分析化学, 1991; 19(3): 309
75 唐祖芬, 施晰昕. 华东冶金学院学报, 1990; 7(3): 81
76 江淑芙, 沈 伟等. 冶金分析, 1991; 11(3): 49
77 傅 勇等. 解放军预防医学杂志, 1993; 11(1): 72
78 王 辉. 冶金分析, 1994; 14(6): 49
79 段生崇等. 云南师范大学学报(自), 1994; 14(2): 52
80 王镇棣等. 化学通报, 1983; (7): 19
81 许生杰等. 分析化学, 1986; 14(12): 909
82 程先忠等. 岩矿测试, 1989; 8(1): 21
83 纽少冲等. 辽宁大学学报(自), 1992; 19(1): 72
84 李慧芝等. 痕量分析, 1992; 8(3,4): 73
85 李祖碧等. 分析化学, 1993; 21(8): 927
86 李祖碧等. 分析化学, 1989; 17(2): 395
87 王献科. 稀有金属, 1984; 8(6): 68
88 江淑芙等. 理化检验(化), 1989; 25(5): 279
89 白俊明等. 山西化工, 1989; (2): 53
90 程 刚等. 分析化学, 1989; 17(2): 112
91 冯 胜, 张治芬. 分析化学, 1991; 19(1): 86
92 李士和, 李生泉等. 分析试验室, 1991; 10(5): 14
93 王宗花, 赵锦端等. 化学试剂, 1990; 12(3): 178
94 邓美珍等. 西南师范大学学报(自), 1993; 18(1): 60
95 石志圣. 分析化学, 1985; 13(6): 439
96 陈功信等. 理化检验(化), 1992; 28(5): 272
97 龙文清等. 食品与发酵工业, 1993; (4): 64
98 戴慕文. 分析化学, 1984; 12(12): 1088
99 李祖碧等. 冶金分析, 1987; 7(6): 4
100 赵琦华等. 痕量分析, 1988; 4(3): 46
101 刘绍璞, 刘忠芳. 化学试剂, 1990; 12(4): 210
102 赵敏政等. 冶金分析, 1990; 10(3): 7
103 张长青等. 贵金属, 1987; 8(2): 34
104 李振亚等. 分析化学, 1988; 16(7): 647
105 翁伯琦等. 土壤通报, 1984; 15(5): 233
106 周亚仙等. 化学试剂, 1985; 7(1): 9
107 李祖碧等. 分析试验室, 1989; 7(8): 13
108 李祖碧等. 分析化学, 1987; 15(10): 870
109 刘忠芬等. 冶金分析, 1988; 9(6): 1
110 沈含熙等. 高等学校化学学报, 1988; 9(9): 897
111 滕毓敏, 许生杰. 应用化学, 1991; 8(2): 37
112 滕毓敏, 许生杰. 分析化学, 1991; 19(5): 514
113 朱丽华, 林桂执等. 冶金分析, 1990; 10(4): 48
114 罗守宽. 重庆大学学报, 1992; 15(6): 54
115 罗守宽. 分析试验室, 1993; 12(1): 97
116 王献科等. 新疆有色金属, 1993; (2): 26
117 王献科等. 中国钼业, 1994; 18(4): 39
118 罗宗铭等. 岩矿测试, 1994; 13(3): 189
119 白林山等. 冶金分析, 1995; 15(3): 26
120 郑启梅. 浙江师大学报(自), 1994; 17(1): 57
121 吴于卿等. 分析化学, 1985; 13(6): 452
122 李祖碧等. 稀有金属, 1988; 12(2): 152
123 罗宗铭, 邹汉明, 杨树南. 化学通报, 1992; (1): 41
124 李祖碧, 徐其亨. 分析化学, 1992; 20(5): 520
125 李祖碧等. 冶金分析, 1992; 12(4): 9
126 王加林等. 云南化工, 1993; (1): 34
127 李祖碧等. 岩矿测试, 1989; 8(3): 179
128 李振亚等. 分析化学, 1989; 17(2): 118
129 赵敏政等. 分析化学, 1992; 20(10): 1147
130 吕耀忠等. 分析试验室, 1993; 12(3): 48
131 李祖碧等. 分析试验室, 1995; 14(2): 18
132 何国忠等. 中华预防医学杂志, 1984; 18(3): 170
133 张 云等. 冶金分析, 1985; 5(2): 161147
134 郑厚德. 分析试验室, 1985; 4(4): 64
135 徐其亨. 云南大学学报(自), 1985; (1): 65
136 刘长松等. 山西大学学报, 1984; (4): 33
137 林克崇等. 理化检验(化), 1984; 20(6): 39
138 王修林. 分析化学, 1984; 12(9): 857
139 李佑清. 环境科学与技术, 1984; (2): 26
140 马树屏. 冶金分析, 1983; 3(5): 309
141 刘鹏飞. 上海环境科学, 1983; 2(4): 34
142 陈宏权等. 理化检验(化), 1983; 19(5)
143 刘长松等. 分析化学, 1988; 16(3): 211
144 蒙 飞等. 分析化学, 1986; 14(11): 809
145 张振辉等. 江西大学学报(自), 1986; 10(4): 25
146 贺晓唯等. 应用化学, 1989; 6(5): 39
147 刘鹤仙等. 分析试验室, 1988; 7(10): 22
148 黄德树等. 江西冶金, 1988; 8(4): 41
149 陈朝阳. 环境与健康杂志, 1989; 6(3): 29
150 丁源沂. 中华医学检验杂志, 1991; 14(2): 75
151 张红琴等. 分析化学, 1991; 19(4): 413
152 唐上廷等. 冶金分析, 1991; 11(5): 49
153 翁建斌等. 中国环境监测, 1991; 7(6): 58
154 侯永禄. 理化检验(化学), 1990; 26(5): 288
155 张旭芳等. 痕量分析, 1992; 8(2): 30
156 陈德萍等. 江西冶金, 1993; 13(1): 33
157 何 斌. 土壤通报, 1993; 24(5): 236
158 籍建峰. 河北冶金, 1994; (1): 57
159 刘汉初等. 理化检验, 1994; 30(5): 286
160 许生杰等. 分析化学, 1993; 21(6): 685
161 吴乃钧等. 南京化工学院学报, 1993; 15(4): 24
162 王金秀. 冶金分析, 1995; 15(2): 45
163 李 樟. 云南冶金, 1995; 24(1): 46
164 李法鸿. 湖南冶金, 1995; (1): 48
165 詹才清. 化学世界, 1984; 25(1): 12
166 侯 明等. 分析试验室, 1993; 12(4): 75
167 李光秀等. 药物分析杂志, 1995; 15(2): 41
168 尹哲俊等. 分析化学, 1989; 17(8): 750

169 何鼎峰等. 冶金分析，1990；8(5)：10
170 程 刚等. 分析化学，1992；20(4)：403
171 肖满田. 理化检验(化)，1990；26(5)：277
172 肖满田. 电镀与环保，1990；10(4)：17
173 李振亚等. 分析化学，1985；13(9)：698
174 程书麟等. 四川大学学报(自)，1990；27(3)：332
175 李志良等. 稀有金属，1992；16(6)：465
176 孙培培等. 理化检验(化)，1993；29(6)：327
177 李振亚等. 贵金属，1987；8(2))：28
178 赵敏政等. 稀有金属，1988；7(1)：51
179 李振亚等. 分析化学，1985；13(9)：698
180 李玲颖等. 化学试剂，1988；10(2)：78
181 张长青等. 贵金属，1989；10(3)：48
182 吕耀忠等. 山西大学学报(自)，1992；15(2)：152
183 李士和等. 分析试验室，1992；11(2)：35
184 李振亚等. 分析试验室，1992；11(2)：29
185 李祖碧等. 分析试验室，1995；14(1)：15
186 李祖碧等. 分析试验室，1995；23((1)：52
187 陈淑桂等. 分析化学，1995；23(2)：176
188 郑文军等. 冶金分析，1987；7(6)：1
189 郑文军等. 贵金属，1987；8(2)：40
190 刘鹤仙等. 山西大学学报(自)，1989；12(3)：299
191 黄万兰等. 贵金属，1991；12(1)：54
192 李玲颖等. 化学试剂，1990；12(5)：274
193 李祖碧等. 分析化学，1994；22(11)：1125
194 李祖碧等. 冶金分析，1995；15(1)：1
195 江智美等. 冶金分析，1987；7(6)：1
196 李振亚等. 科学通报，1988；33(9)：673
197 赵敏政等. 分析化学，1988；16(10)：865
198 李祖碧等. 化学试剂，1990；12(6)：324
199 李祖碧等. 分析科学学报，1995；11(2)：28
200 程 刚等. 冶金分析，1989；9(2)：5
201 胡 捷等. 分析化学，1990；18(5)：457
202 陈孟阳. 湘潭大学自然科学学报，1988；10(4)：59
203 臧二乐等. 痕量分析，1990；(3,4)：67
204 徐 荃等. 分析化学，1993；21(9)：1003
205 曾纪铭等. 黑龙江大学自然科学学报，1995；12(1)：90
206 胡俐娟等. 分析试验室，1994；13(3)：36
207 侯 明等. 理化检验，1994；30(5)：280
208 李晓明. 分析化学，1988；16(1)：25
209 叶率官等. 分析化学，1984；12(12)：1047
210 李治坤. 冶金分析，1983；3(5)：274
211 王镇棣等. 高等学校化学学报，1986；7(9)：775
212 刘长松等. 分析化学，1988；16(3)：211
213 贺晓唯等. 分析化学，1988；16(12)：1086
214 刘鹤仙等. 山西大学学报(自)，1990；13(1)：40
215 李士和等. 高等学校化学学报，1988；9(10)：998
216 汪明礼. 稀有金属，1988；7(4)：286
217 黄 希等. 山东冶金，1991；13(4)：49
218 侯永禄. 冶金分析，1993；13(1)：46
219 张明浩等. 中国有色金属学报，1994；3(5)：38
220 李祖碧等. 分析化学，1988；16(5)：390
221 余协瑜. 冶金分析，1993；13(3)：27
222 李祖碧等. 分析试验室，1991；10(1)：11
223 罗宗铭等. 岩矿测试，1991；10(2)：89
224 王加林等. 云南化工，1992；(4)：21
225 李祖碧等. 岩矿测试，1993；12(1)：38
226 刘绍璞等. 高等学校化学学报，1988；9(8)：774
227 李祖碧等. 化学通报，1993；(3)：44
228 李祖碧等. 分析化学，1993；21(3)：272
229 方国桢等. 化学通报，1994；(11)：41
230 方国桢等. 理化检验(化)，1995；31(1)：11
231 杨志斌等. 江西大学学报(自)，1989；13(1)：83
232 杜乃林等. 分析试验室，1993；12(3)：68
233 刘少陵等. 郑州大学学报(自)，1989；21(1)：63
234 李祖碧. 岩矿测试，1991；10(4)：306
235 刘绍璞等. 西南师范大学学报(自)，1993；18(1)：39
236 罗红群等. 分析化学，1993；21(10)：1179
237 吕耀忠等. 山西大学学报(自)，1985；(1)：41
238 揭念碧等. 核化学与放射化学，1991；13(1)：62
239 李祖碧等. 核化学与放射化学，1990；12(4)：220
240 刘汉初等. 环境科学与技术，1992；(3)：20
241 刘绍璞等. 岩矿测试，1992；11(4)：311
242 李中植. 云南冶金，1984；(6)：40
243 王长发等. 分析化学，1984；12(10)：909
244 晏干卿等. 冶金分析，1982；2(6)：33
245 丁建权等. 分析化学，1982；10(7)：388
246 揭念芩. 冶金分析，1989；9(4)：36
247 赵琦华等. 云南冶金，1990；19(1)：53
248 姜效军等. 稀有金属，1990；14(4)：307
249 刘绍璞等. 高等学校化学学报，1989；10(8)：800
250 黄业初. 理化检验(化)，1993；29(3)：157
251 张宏斌. 冶金分析，1993；13(4)：60
252 刘忠芳等. 冶金分析，1992；12(5)：1
253 饶梅芬. 理化检验(化). 1994；30(1)：36
254 龙建林. 四川师范大学学报(自)，1995；18(1)：68
255 罗守宽. 理化检验(化)，1996；32(3)：168
256 李中植. 冶金分析，1983；3(4)：213
257 冯 胜等. 分析化学，1989；17(9)：820
258 张红琴等. 分析化学，1990；18(11)：987
259 齐小玲等. 分析化学，1990；18(2)：164
260 戴豪谦. 冶金分析，1991；11(6)：28
261 赵中一等. 分析化学，1985；13(3)：215
262 刘绍璞等. 化学通报，1982；(4)：208
263 汤仲禧. 理化检验，1988；24(1)：49
264 江淑英等. 冶金分析，1987；7(5)：24
265 肖满田. 电镀与环保，1988；8(5)：17
266 滕毓敏等. 分析化学，1990；18(6)：515
267 李士和等. 分析试验室，1991；10(6)：23
268 吴志强等. 华侨大学学报(自)，1992；13(2)：188
269 胡永清等. 上海金属(有色)，1993；14(3)：39
270 雷淑贞等. 理化检验(化)，1993；29(5)：303
271 李 镇等. 冶金分析，1993；13(4)：28
272 魏先文等. 安徽师大学报(自)，1993；16(4)：41
273 蓝 蔚. 冶金分析，1993；13(2)：31
274 苏剑雄. 华侨大学学报(自)，1994；15(1)：40
275 潘祖亭等. 分析试验室，1994；13(4)：12

参 考 文 献

1 慈云祥，周天泽编著. 分析化学中的配位化合物. 北京：北京大学出版社，1986
2 A. T. 皮里品柯等著，陈国亮等译. 异配位体络合物和异金属络合物及其在分析化学中的应用. 上海：复旦大学出版社，1988
3 罗宗铭编. 三元络合物及其在分析化学中的应用. 北京：人民教育出版社，1981
4 郑用熙. 胶束增溶分光光度法反应机理的探讨. 北京：地质出版社，1980
5 钟静芬主编. 表面活性剂在药学中的应用. 北京：人民卫生出版社，1996
6 戚文彬编著. 表面活性剂与分析化学. 北京：计量出版社，上册（1986）. 下册（1987）

第五篇　红外与拉曼光谱分析法

第十八章　红外吸收光谱原理、常用数据、仪器和实验技术

第一节　红外吸收光谱的基本原理[1~16]

一、红外吸收光谱的产生

当用红外光去照射样品时，此辐射不足以引起分子中电子能级的跃迁，但可以被分子吸收引起振动和转动能级的跃迁。在红外光谱区实际所测得的谱图是分子的振动与转动运动的加和表现，故红外光谱亦称为振转光谱，按红外光波长不同，往往将红外吸收光谱划分为三个区域，如表 18-1 所示。

表 18-1　红外区的划分

区　　域	$\lambda/\mu m$	σ/cm^{-1}	能级跃迁类型
近红外区	0.75~2.5	13300~4000	分子化学键振动的倍频和组合频
中红外区	2.5~25	4000~400	化学键振动的基频
远红外区	25~1000	400~10	骨架振动，转动

物质分子吸收红外光发生振动和转动能级跃迁，必须满足以下两个条件：①红外辐射光量子具有的能量等于分子振动能级能量差 ΔE；②分子振动时必须伴随偶极矩的变化，具有偶极矩变化的分子振动是红外活性振动，否则为非红外活性振动。

由经典力学或量子力学均可推出双原子分子振动频率的计算公式为

$$\nu=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}}\quad (Hz) \tag{18-1}$$

用波数作单位时

$$\sigma=\frac{1}{2\pi c}\sqrt{\frac{k}{\mu}}\quad (cm^{-1}) \tag{18-2}$$

式中　k——键力常数 $(dyn \cdot cm^{-1})$；

μ——折合质量 (g)；$\mu=\frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$，其中 m_1、m_2 分别为两原子质量；

c——光速。

若力常数 k 单位用 $N \cdot cm^{-1}$，折克质量 μ 采用原子质量单位 $m=1.65\times10^{-24}g$，上式可简化为

$$\sigma=1307\sqrt{\frac{k}{\mu}}\quad (cm^{-1}) \tag{18-3}$$

表 18-2 给出了部分键的伸缩振动力常数，表中的力常数除已注明者外，都是由简谐振动频率 ω_e 推算出来的。

表 18-2 键的伸缩振动力常数[①]

键	化学式	$k/(N\cdot cm^{-1})$	键	化学式	$k/(N\cdot cm^{-1})$	键	化学式	$k/(N\cdot cm^{-1})$
H—H	H_2	5.75	C—C	CH_3CN	5.16	P—P	P_2	5.56
Be—H	BeH	2.27	C—F	CF	7.42	P—O	PO	9.45
B—H	BH	3.05		CH_3F	5.71[②④]	O—O	O_2	11.77
C—H	CH	4.48	C—Cl	CCl	3.95		O_3	5.74[②]
	CH_4	5.44[③]		CH_3Cl	3.44[②④]	S—O	SO	8.30
	C_2H_6	4.83[②~④]		$CCl_2{=}CH_2$	4.02[③]		SO_2	10.33[②]
	CH_3CN	5.33[③]	C—Br	CH_3Br	2.89[②④]	S—S	S_2	4.96
	CH_3Cl	5.02[②~④]	C—I	CH_3I	2.34[②④]	F—F	F_2	4.70
	$CCl_2{=}CH_2$	5.57[③]	C—O	CO	19.02	Cl—F	ClF	4.48
	HCN	6.22		CO_2	16.00	Br—F	BrF	4.06
N—H	NH	5.97		OCS	16.14	Cl—Cl	Cl_2	3.23
O—H	OH	7.80		CH_3OH	5.42[②④]	Br—Cl	BrCl	2.82
	H_2O	8.45	C—S	CS	8.49	Br—Br	Br_2	2.46
P—H	PH	3.22		CS_2	7.88	I—I	I_2	1.72
S—H	SH	4.23		OCS	7.44	Li—Li	Li_2	0.26
	H_2S	4.28	C—N	CN	16.29	Li—Na	LiNa	0.21
F—H	HF	9.66		HCN	18.78	Na—Na	Na_2	0.17
Cl—H	HCl	5.16		CH_3CN	18.33	Li—F	LiF	2.50
Br—H	HBr	4.12		CH_3NH_2	5.12[②④]	Li—Cl	LiCl	1.43
I—H	HI	3.14	C—P	CP	7.83	Li—Br	LiBr	1.20
Li—H	LiH	1.03	Si—Si	Si_2	2.15	Li—I	LiI	0.97
Na—H	NaH	0.78	Si—O	SiO	9.24	Na—F	NaF	1.76
K—H	KH	0.56	Si—F	SiF	4.90	Na—Cl	NaCl	1.09
Rb—H	RbH	0.52	Si—Cl	SiCl	2.63	Na—Br	NaBr	0.94
Cs—H	CsH	0.47	N—N	N_2	22.95	Na—I	NaI	0.76
C—C	C_2	12.16		N_2O	18.72	Be—O	BeO	7.51
	$CCl_2{=}CH_2$	8.43	N—O	NO	15.95	Mg—O	MgO	3.48
	C_2H_6	4.50[②④]		N_2O	11.70	Ca—O	CaO	3.61

① 表引自 Handbook of Chemistry and physics, CRC press Inc。

② 由基频振动推算出，未作非简谐性校正。

③ 对称和不对称(或简并)模式的平均值。

④ 由 Local 对称力场算出。

二、简正振动和振动类型

(一) 简正振动

描述分子振动状态的自由度有 $3n-6$ 个，对于线性分子有 $3n-5$ 个，即分子有 $3n-6$ 或 $3n-5$ 个简正振动方式。n 为分子中的原子数。

所谓简正振动是指这样一种振动状态，分子质心保持不变，整体不转动，每个原子都在其平衡位置附近作简谐振动，其振动频率和位相都相同，即每个原子都在同一瞬间通过其平衡位置，而且同时到达其最大位移值。分子中任何一个复杂振动都可以看成是简正振动的叠加。水分子和二氧化碳的简正振动如图 18-1 所示。

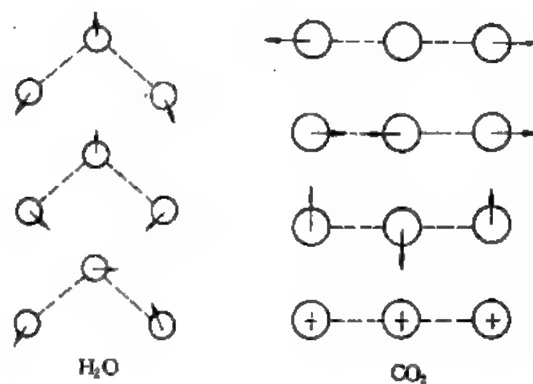


图 18-1 水分子与二氧化碳分子简正振动模式

非线性分子有 $3n-6$ 个基频，可用下列方程计算属于每一种振动类型基频数：

$$N_i=\frac{1}{N_g}\Sigma n_e\xi(R)\chi_i(R) \tag{18-4}$$

式中 N_i——振动类型 i 的基频数；

n_e——每一类型中元的数目；

N_g——群中元数，$N_g=\Sigma n_e$；

$\chi_i(R)$——是振动类型 i 和操作 (R) 的迹（或特征数）；

对于专一的转动 $\xi(R)=(U_R-2)(1+2\cos\phi)$

对于非专一转动 $\xi(R)=U_R(-1+2\cos\phi)$

式中 U_R 为在对称操作中保持不动的原子数，ϕ 为对称操作中转动的角度。

当用（18-4）式计算某个分子的各种振动类型基频数时，首先要确定该分子属什么点群，然后查出属于该点群的特征标表，则 N_g，n_e 的 $\chi_i(R)$都可从表中查出，$\xi(R)$ 从上面公式计算，代人公式（18-4）就可算出 N_i。

具有红外活性振动的基频数目可用下列公式求出：

$$N_i(M)=\frac{1}{N_g}\Sigma n_e\chi_M(R)\chi_i(R) \tag{18-5}$$

式中 $\chi_M(R)=\pm1+2\cos\phi$，其他符号的意义同公式（18-4）。

$\chi_M(R)$ 是各个转动对称操作产生的位移坐标变换矩阵的迹，它和偶极矩的变换矩阵的迹相同，对于正常转动 $\chi_M(R)=+1+2\cos\phi$，非正常转动 $\chi_M(R)=-1+2\cos\phi$。

每种简正振动都有其特定的振动频率，但红外光谱中基频谱带的数目常小于振动自由度，其原因有：①简并，不同振动类型有相同的振动频率；②非红外活性振动；③由于仪器分辨率低，灵敏度不够，测量波长范围窄。

红外光谱的吸收峰除基频外，还有倍频峰和合频峰。倍频峰是由基态（$v=0$）跃迁到 $v=2$，3，……激发态引起的，一般一级倍频峰（$v=2$）的强度仅有基频峰的 1/10～1/100。合频峰是在两个以上基频峰波数之和（$\sigma_1+\sigma_2+\cdots\cdots$）或差（$\sigma_1-\sigma_2-\cdots\cdots$）处出现的吸收峰，吸收强度比基频峰弱得多。

（二）红外光谱中振动类型及其表示符号

为更直观地描述分子振动，可采用化学键键长或键角的改变来表示，并引人对称的概念。分子的振动类型可分为两大类：伸缩振动，是指原子沿键轴方向伸缩，使键长发生变化的振动；变形振动，它是官能团的键角发生周期变化的振动。

各种振动形式的中、英文名称和符号如下所示：

振动类型	英文名称	符号
伸缩振动	stretching vibration	ν
对称伸缩振动	symmetrical stretching vibration	ν^s
不对称伸缩振动	asymmetrical stretching vibration	ν^{as}
变形振动	deformation vibration	δ
对称变形振动	symmetrical deformation vibration	δ^s
不对称变形振动	asymmetrical deformation vibration	δ^{as}
弯曲振动	bending vibration	δ
面内弯曲振动	in-plane bending vibration	β
面外弯曲振动	out-of-plane bending vibration	γ
卷曲振动	twisting vibration	τ
平面摇摆振动	rocking vibration	ρ
非平面摇摆振动	wagging vibration	ω

伸缩振动和变形振动方式分别描述在图 18-2 中。

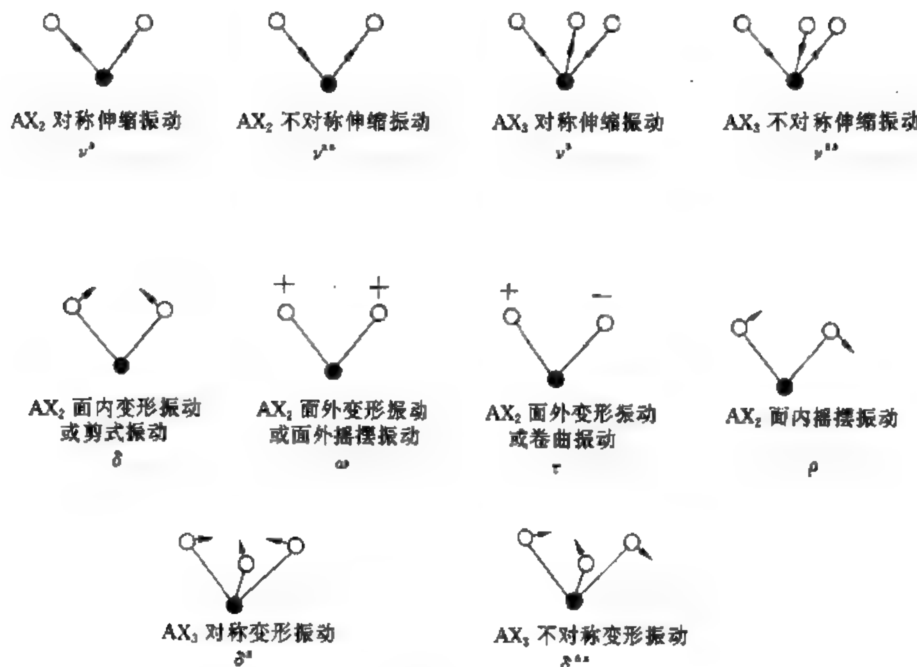


图 18-2　伸缩振动和变形（弯曲）振动

+—表示由纸面向外；——表示由纸面向内

三、振动频率理论和振动谱带强度理论简介

以 Wilson 为代表，发展了振动频率理论——简正坐标分析。该方法的第一步必须根据振动光谱的选律求出全部的振动基频在对称类中的分类，即求出每一种振动类型的基频数。第二步是选取坐标系建立分子的动能矩阵 G，常用的坐标系是笛卡尔位移坐标系，内坐标系和对称坐标系，在建立对称坐标系时可以采用 Wilson 方法（经验法），Woodward 法（正交归一法）或 Califano 法。简正坐标分析的第三步是选取力场建立 F 矩阵（势能矩阵）。选取的力场有简单键力场（SFF），简化广义键力场（SGVFF），广义键力场（GVFF），中心键力场（CFF），岛内-Urey-Bradley 力场（SUBFF）和改良的 SUB 力场（MSUBFF）等，其中 SUBFF 的力常数具有一定的互换性，其物理意义明确，被广泛应用。当求出分子振动的 G 矩阵和 F 矩阵后即可列出久期方程 $|GF-I\lambda|=0$，解久期方程即可求出本征值 λ（振动频率）和本征矢量（振动振幅），最后根据势能分布可以求出振动的归属。简正坐标分析的计算机程序相继问世，最早的是由 Schachtschneider 在 1964 年提出，其后是 Shimanouchi 的研究，直至 1976 年加拿大国家研究委员会 Fuhrer 等发表了一个分子振动分析的软件包[4]，使简正坐标分析为有机化学工作者所用。我国石油化工科学研究院王宗明等对此软件包进行了两次开发，使之可用于 PC 微机，该程序已被国内一些研究单位和高校采用。

以 Волькенштейн 为代表发展了谱带强度理论——价键光学理论，后经 Свердлов 和 Грибов 等发展。该理论把光谱谱带的强度与分子中价键的特性相关联，能够给出键矩，键极化率以及这些量在分子振动时所产生的变化，并可预示光谱谱带的强度分布。该理论选用电-光学参数来表示偶极矩对简正坐标的导数。由 Gribov 等发展的光学光谱软件包可用简正坐标方法和

强度的光-电参数法处理红外和拉曼光谱数据，给出计算频率，势能分布，振动归属以及分子键矩和键极化率张量对简正振动坐标的导数，生成分子碎片库数据，也能用来解反向电-光学参数问题，以及用于生成预示光谱图。

第二节　红外光谱分析常用数据

一、波长与波数的互换[17]

表 18-3　波长波数换算表

λ/μm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					σ/cm^{-1}					
1.00	10000	9902	9804	9709	9616	9524	9434	9346	9260	9175
1.10	9091	9010	8930	8847	8770	8696	8620	8549	8474	8405
1.20	8333	8264	8196	8130	8065	8000	7936	7874	7812	7754
1.30	7692	7635	7575	7518	7463	7407	7353	7300	7246	7194
1.40	7143	7092	7042	6993	6944	6897	6847	6803	6756	6711
1.50	6667	6622	6580	6536	6494	6452	6410	6369	6328	6290
1.60	6250	6212	6173	6135	6098	6061	6024	5988	5953	5917
1.70	5882	5834	5815	5768	5748	5714	5682	5649	5618	5586
1.80	5556	5525	5494	5464	5436	5405	5376	5348	5319	5290
1.90	5263	5236	5208	5181	5154	5128	5101	5076	5051	5024
2.00	5000	4975	4951	4926	4902	4878	4854	4831	4808	4785
2.10	4762	4739	4717	4695	4673	4651	4630	4608	4587	4566
2.20	4545	4525	4505	4484	4465	4444	4425	4405	4386	4367
2.30	4348	4329	4310	4292	4274	4255	4237	4219	4202	4184
2.40	4167	4149	4132	4115	4098	4082	4065	4049	4032	4016
2.50	4000	3984	3968	3953	3937	3922	3906	3891	3876	3861
2.60	3846	3831	3817	3802	3788	3774	3759	3745	3731	3718
2.70	3704	3690	3677	3663	3650	3636	3623	3610	3597	3584
2.80	3571	3559	3546	3534	3521	3509	3497	3484	3472	3460
2.90	3448	3436	3425	3413	3401	3390	3378	3367	3356	3345
3.00	3333	3322	3311	3300	3290	3279	3268	3257	3247	3236
3.10	3226	3215	3205	3195	3185	3175	3165	3155	3145	3135
3.20	3125	3115	3106	3096	3086	3077	3068	3058	3049	3040
3.30	3030	3021	3012	3003	2994	2985	2976	2967	2957	2950
3.40	2941	2933	2924	2916	2907	2899	2890	2882	2874	2865
3.50	2857	2849	2841	2833	2825	2817	2809	2801	2793	2786
3.60	2778	2770	2762	2755	2747	2740	2732	2724	2717	2710
3.70	2703	2695	2688	2681	2674	2667	2660	2653	2646	2639
3.80	2632	2625	2618	2611	2604	2597	2591	2587	2577	2571
3.90	2564	2558	2551	2545	2538	2532	2525	2519	2513	2506
4.00	2500	2494	2488	2481	2475	2469	2463	2457	2451	2445
4.10	2439	2433	2427	2421	2416	2410	2404	2398	2392	2387
4.20	2381	2375	2370	2364	2359	2353	2347	2342	2336	2331
4.30	2326	2320	2315	2309	2304	2299	2294	2288	2283	2278
4.40	2273	2268	2262	2257	2252	2247	2242	2237	2232	2227
4.50	2222	2217	2212	2208	2203	2198	2193	2188	2183	2179
4.60	2174	2169	2165	2160	2155	2151	2146	2141	2137	2132
4.70	2128	2123	2118	2114	2110	2105	2101	2096	2092	2088
4.80	2083	2079	2075	2070	2066	2062	2058	2053	2049	2045
4.90	2041	2037	2033	2028	2024	2020	2016	2012	2008	2004
5.00	2000	1996	1992	1988	1984	1980	1976	1972	1969	1965
5.10	1961	1957	1953	1949	1946	1942	1938	1934	1930	1927
5.20	1923	1919	1916	1912	1908	1905	1901	1898	1894	1890
5.30	1887	1883	1880	1876	1873	1869	1866	1862	1859	1855
5.40	1852	1848	1845	1842	1838	1835	1832	1828	1825	1822
5.50	1818	1815	1812	1808	1805	1802	1799	1795	1792	1789
5.60	1786	1783	1779	1776	1773	1770	1767	1764	1761	1758
5.70	1754	1751	1748	1745	1742	1739	1736	1733	1730	1727
5.80	1724	1721	1718	1715	1712	1709	1707	1704	1701	1698
5.90	1695	1692	1689	1686	1684	1681	1678	1675	1672	1669
6.00	1667	1664	1661	1658	1656	1653	1650	1647	1645	1642
6.10	1639	1637	1634	1631	1629	1626	1623	1621	1618	1616
6.20	1613	1610	1608	1605	1603	1600	1597	1595	1592	1590
6.30	1587	1585	1582	1580	1577	1575	1572	1570	1567	1565
6.40	1563	1560	1558	1555	1553	1550	1548	1546	1543	1541
6.50	1538	1536	1533	1531	1529	1527	1524	1522	1520	1518

续表

λ/μm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					σ/cm^{-1}					
6.60	1515	1513	1511	1508	1506	1504	1502	1499	1497	1495
6.70	1493	1490	1488	1486	1484	1482	1479	1477	1475	1473
6.80	1471	1468	1466	1464	1462	1460	1458	1456	1454	1451
6.90	1449	1447	1445	1443	1441	1439	1437	1435	1433	1431
7.00	1429	1427	1426	1423	1421	1418	1416	1414	1412	1410
7.10	1408	1407	1405	1403	1401	1399	1397	1395	1393	1391
7.20	1389	1387	1385	1383	1381	1379	1377	1376	1374	1372
7.30	1370	1368	1366	1364	1362	1361	1359	1357	1355	1353
7.40	1351	1350	1348	1346	1344	1342	1340	1339	1337	1335
7.50	1333	1332	1330	1329	1327	1325	1323	1321	1319	1317
7.60	1316	1314	1312	1311	1309	1307	1306	1304	1302	1300
7.70	1299	1297	1295	1294	1292	1290	1289	1287	1285	1284
7.80	1282	1280	1279	1277	1276	1274	1272	1271	1269	1267
7.90	1266	1264	1263	1261	1259	1258	1256	1255	1253	1252
8.00	1250	1248	1247	1245	1244	1242	1241	1239	1238	1236
8.10	1235	1233	1232	1230	1229	1227	1226	1224	1223	1221
8.20	1220	1218	1217	1215	1214	1212	1211	1209	1208	1206
8.30	1205	1203	1202	1201	1199	1198	1196	1195	1193	1192
8.40	1191	1189	1188	1187	1185	1183	1182	1181	1179	1178
8.50	1177	1175	1174	1172	1171	1170	1168	1167	1166	1164
8.60	1163	1161	1160	1159	1157	1156	1155	1153	1152	1151
8.70	1149	1148	1147	1146	1144	1143	1142	1140	1139	1138
8.80	1136	1135	1134	1133	1131	1130	1129	1127	1126	1125
8.90	1124	1122	1121	1120	1119	1117	1116	1115	1114	1112
9.00	1111	1110	1109	1107	1106	1105	1104	1103	1101	1100
9.10	1099	1098	1097	1095	1094	1093	1092	1091	1089	1088
9.20	1087	1086	1085	1083	1082	1081	1080	1079	1078	1076
9.30	1075	1074	1073	1072	1071	1070	1068	1067	1066	1065
9.40	1064	1063	1062	1060	1059	1058	1057	1056	1055	1054
9.50	1053	1052	1050	1049	1048	1047	1046	1045	1044	1043
9.60	1042	1041	1041	1038	1037	1036	1035	1034	1033	1032
9.70	1031	1030	1029	1028	1027	1026	1025	1024	1023	1022
9.80	1020	1019	1018	1017	1016	1015	1014	1013	1012	1011
9.90	1010	1009	1008	1007	1006	1005	1004	1003	1002	1001
10.0	1000	990	980	971	962	952	943	935	926	917
11.0	909	901	893	885	877	870	862	855	847	840
12.0	833	826	820	813	806	800	794	787	781	775
13.0	769	763	758	752	746	741	735	730	725	719
14.0	714	709	704	699	694	690	685	680	676	671
15.0	667	663	658	654	649	645	641	637	633	629
16.0	625	621	617	614	610	606	602	599	595	592
17.0	588	585	581	578	575	572	568	565	562	559
18.0	556	553	549	546	543	541	538	535	532	529
19.0	526	524	521	518	515	513	510	508	505	503
20.0	500	498	495	493	490	488	485	483	481	478
21.0	476	473	472	470	467	465	463	461	459	457
22.0	455	453	450	448	446	444	442	441	439	437
23.0	435	433	431	429	427	426	424	422	420	419
24.0	417	415	413	412	410	409	407	405	403	402
25.0	400									

二、红外区的透光材料

在红外区，需要选用不同的光学材料作为窗片、基质和棱镜等，不同光学材料透过红外光的波长范围、物理性能均有所不同。表 18-4 介绍了比较常用的红外透光材料的一些性能。

表 18-4 中材料的红外透光范围以图的形式表示见图 18-3，图中▩部分表示其厚度为 2mm 时 $\tau<10\%$，▧部分表示尚无数据提供，图中的数字和表 18-4 中的数字一致，代表同一种材料。

适用于近红外谱区的光学材料比中红外谱区的多得多，参见表 18-4，其中熔融石英、石英、火石玻璃、CaF、NaCl、AgCl、KBr 等都适用于近红外谱区，特别是一些透红外的玻璃，上海光学玻璃厂的 HWB1-HWB4 型玻璃，在近红外区有良好的光学性能与物理性能，价格又比较便宜，是近红外谱区的适用材料。

表18.4 红外光区常用光学材料透光范围和物理性能[10]

材料名称	透光范围 λ/μm	折射率/μm	Knoop 硬度/(gm,K)	水中溶解度/(g·100ml⁻¹)(K)	熔点 T/K	密度/(g·cm⁻³)(K)	热导率/(cgs×10⁻³)(K)	热线膨胀系数/10⁻⁶(K)	杨氏模量/(psi×10⁶)	介电常数 (Hz,K)
1 Diamond	0.25~2									
	7~1000	2.41(5)		不溶	>3500	3.51	478	1.1		
2 Silicon	1.2~15									
	30~1200	3.42(5)	1150(—,298)	不溶	1691	2.0~2.4(298)	75(313)	3.9(350)	19	13(9.4×10⁹,—)
3 Germanium	1.8~23									
	50~1300	4.01(5)	780(—,373)	不溶	1210	5.33(298)	14(293)	5.7(290)	14.9	16.6(5.4×10⁹,—)
4 Selenium (amorph.)	1~20	2.42(5)		不溶	500	4.82	0.31(308)	48(293)		5(10⁶~10¹⁰,—)
5 Tellurium	3.5~8	4.8~5.3		不溶	723	6.24(298)	1.5	6		
6 MgO	0.25~8.5									
	120~1500	1.63(5)	692(600,—)	不溶	3125	3.57(298)	14(300)	11.2(300)	36.1	9.7(10²~10⁸,—)
7 Sapphire	0.14~6.5									
(Al_2O_3)	150~1200	1.61(5)	1370(1000,—)	不溶	2303	3.98	6(300)	≈6(323)	50	~9(10²~10⁸,298)
8 Spinel(MgO/Al_2O_3)	0.6~5	1.73(0.5)	1140(100,—)	不溶	2300	3.61	3.3(308)	5.9(313)		8.5
9 TiO_2	0.43~6.2	2.29(5)	879(500,—)	不溶	2113	4.25	≈2.5(310)	≈8(313)		~100(10²~10⁸,298)
10 Cryst.	0.12~4.5									
Quartz	≈100~1000	1.50(3)	741(500,—)	不溶	883(?)	2.65(298)	≈25(293)	≈10(300)	11~14	4.3(3×10⁹,293)
11 Fused	0.12~4.5									
silica	≈60~1300	1.42(3)	461(200,—)	不溶	≈1700	2.20(293)	3.3(300)	0.5(300)	10.6	3.8(10²~10⁹,300)
12 LiF	0.12~9.0	1.33(5)	102(600,—)	0.27(291)	1143	2.64(290)	2.7(311)	37(300)	9.4	9(10²~10⁶,298)
13 NaF	0.19~15	1.30(5)		4.22(291)	1268	2.79(293)	13.4(323)	35(300)		6(2×10⁶,297)
14 MgF_2	0.11~7.5									
	200~1500	1.39(5)		0.007(291)	1534	2.9~3.2(298)		≈10(300)		~5(10⁶,—)

续表

材料名称	透光范围 λ/μm	折射率/μm	Knoop硬度值(μm,K)	水中溶解度/(g·100ml⁻¹)(K)	熔点 T/K	密度/(g·ml⁻¹)(K)	热导率(cal×10⁻⁴)(K)	热膨胀系数/10⁻⁶(K)	杨氏模量(psi×10⁶)	介电常数 ε(Hz,K)
15 CaF_2	0.13~12									
	350~1200	1.40(5)	158(500,—)	0.002(293)	1696	3.18(298)	9.3(83)	≈18(250)	11	6.8(10⁶,—)
16 SrF_2	0.12~14	1.43(1)		0.011(273)	1743(?)	4.24(293)				7.7(2×10⁶,—)
17 BaF_2	0.15~15	1.46(5)	82(500,—)	0.17	1553	4.89(298)	2.8(286)	≈18(300)	7.6	7.3(2×10⁶,—)
18 LaF_3	0.4~11	$1.60^{(2)}$(1)		不溶	1766	5.94				
19 PbF_2	0.25~16	1.70		0.06	1129	8.24(298)				3.6(10⁶,—)
20 NaCl	0.21~25	1.52(5)	15(200,—)	35.7(293)	1074	2.16(293)	1.55(280)	44(300)	5.8	5.9(10²~10¹⁰,298)
21 KCl	0.21~30	1.47(5)	8(200,—)	34.7(293)	1049	1.98(293)	1.56(315)	36(300)	4.3	4.8(10⁶,300)
22 AgCl	0.4~28	2.00(5)	12(200,—)	不溶	728	5.56(293)	0.26(295)	30(293)	0.92	12.3(10⁶,293)
23 AgBr	0.186~40	2.23(0.7)		不溶	432	6.47(298)				
24 KBr	0.25~40	1.54(5)	6(200,—)	53.5(273)	1003	2.75(298)	0.7(299)	43(300)	3.9	4.9(10²~10¹⁰,298)
25 CsBr	0.3~55	1.66(5)	20(200,—)	124(298)	905	4.44(293)	0.38(298)	48(300)	2.1	6.7(2×10⁶,298)
26 TlBr	0.42~45	2.35(0.75)	12(500,—)	0.05(298)	733	7.45(298)	0.14(315)	51(300)	4.3	30(10²~10⁷,298)
27 KI	0.25~47	1.63(5)		128(273)	954	3.13	0.5(299)	43(313)	4.6	4.9(2×10⁶,—)
28 CsI	0.24~70	1.74(5)		44(273)	899	4.53	0.27(298)	50(300)	0.75	5.7(10⁶,298)
29 KRS-5	0.5~40	2.38(5)	40(200,—)	0.05(293)	688	7.37(288)	0.13(293)	58(300)	2.3	33(10²~10⁷,298)
30 KRS-6	0.5~30	2.20(5)	31(500,—)	0.32(293)	697	7.19(288)	0.17(325)	51(293)	3.0	32(10²~10⁷,298)
31 Calcite ($CaCO_3$)	0.2~5.5⁽²⁾	1.47~1.67⁽²⁾(5)		0.002(298)	63	2.71(293)	~5.5(273)	(2)	~13⁽²⁾	8.5⁽²⁾(10⁴,293)
32 $SrTiO_3$	0.4~6.8	2.40(1)	595	不溶	2353	5.12(298)		9.4		306(10²~10¹⁰,298)
33 $BaTiO_3$	0.5~7.5	2.40(1)			1873	5.90	0.16(401)	19(300)	4.9	1200(10²~10⁸,298)
34 $CaAl_2O_4$ 玻璃	0.4~5.5	1.63(2)	600		≈1170	3.0	0.3(298)	9.5(300)	15.0	9.6(10¹⁰,295)
35 As_2S_3 玻璃	0.6~12	2.41(5)	109(100,—)	不溶	483	3.20	0.39(313)	25(330)	2.3	8.1(10²~10¹⁰,—)
36 ZnS	0.4~14.5									
	≈200~1200	2.22(5)	178	不溶	2103	4.08	4(296)	7.85	10.8	

续表

材料名称	透光范围 λ/μm	折射率/n(μm)	Knoop 硬度值 (gm,K)	水中溶解度/(g·100ml⁻¹)(K)	熔点 T/K	密度/(g·ml⁻¹)(K)	热导率 (cgs×10⁻³)(K)	热线膨胀系数/10⁻⁶(K)	弹性模量 (psi④×10⁶)	介电常数 ε(Hz,K)
37 CdS	0.52~15	2.30(1.5)	82	不溶	1560	4.82(293)	3.8(287)	4(300)		
38 PbS	2~5	4.1(5)		不溶	1387	7.5	0.15(—)			17.9(10⁶,288)
39 CdTe	0.9~15	2.56(10)	50	不溶	≈1320	5.85(298)	1.5(—)	4.5(323)		≈11(10⁶, —)
40 As改性的Se玻璃	0.8~18	2.44(5)		不溶	≈340		0.0[illegible]	31		
41 ZnSe	0.45~21.5									
	≈250~1000	2.43(5)	137	不溶	1788	5.27(298)	3.1(327)	7.6(300)		
42 InP	1~14	3.04(5)	430		≈1340	4.5		4.5		
43 InSb	7~16	3.5(10)	225	不溶	808	5.78	6.5(293)	5(300)	6.2	
44 GaAs	1~15	3.34(5)	721	不溶	1511	5.32(298)	12.5(300)	5.7(300)		11(10⁶, —)
45 GaSb	τ<10%									
	2~3	3.80(3)	460	不溶	993		12.0(300)	6.9	9.2	
46 Irtran 1	1~8.5									
	200~1000	1.34(5)	575	不溶	1528	3.18(298)	3.5(329)	11(300)	16.6	
47 Irtran 2	0.4~14.5									
	≈200~1000	2.22(5)	355	不溶	2103	4.09(298)	3.7(327)	7(300)	14	
48 Irtran 3	0.4~12									
	300~1000	1.40(5)	200	不溶	1632	3.18(298)	1.9(335)	20(300)	14.3	
49 Irtran 4	0.45~21.5									
	≈250~1000	2.43(5)	150	不溶	1788	5.27(298)	3.1(327)	8(300)	10.3	
50 Irtran 5	0.4~9									
	180~1000	1.64(5)	640	不溶	3223	3.58(298)	10.4(298)	12(300)	48.2	
51 聚乙烯	16~1000	1.52(5)		不溶	≈383	0.93	0.11	135	≈0.03	2.3(10⁶,298)
52 TPX	23~1000	1.43(5)		不溶	518	0.83	0.40	117	≈0.7	2.1(10⁶,298)

① 双重折射。

② 各向异性。

③ 分解。

④ 1psi=0.6895Pa。

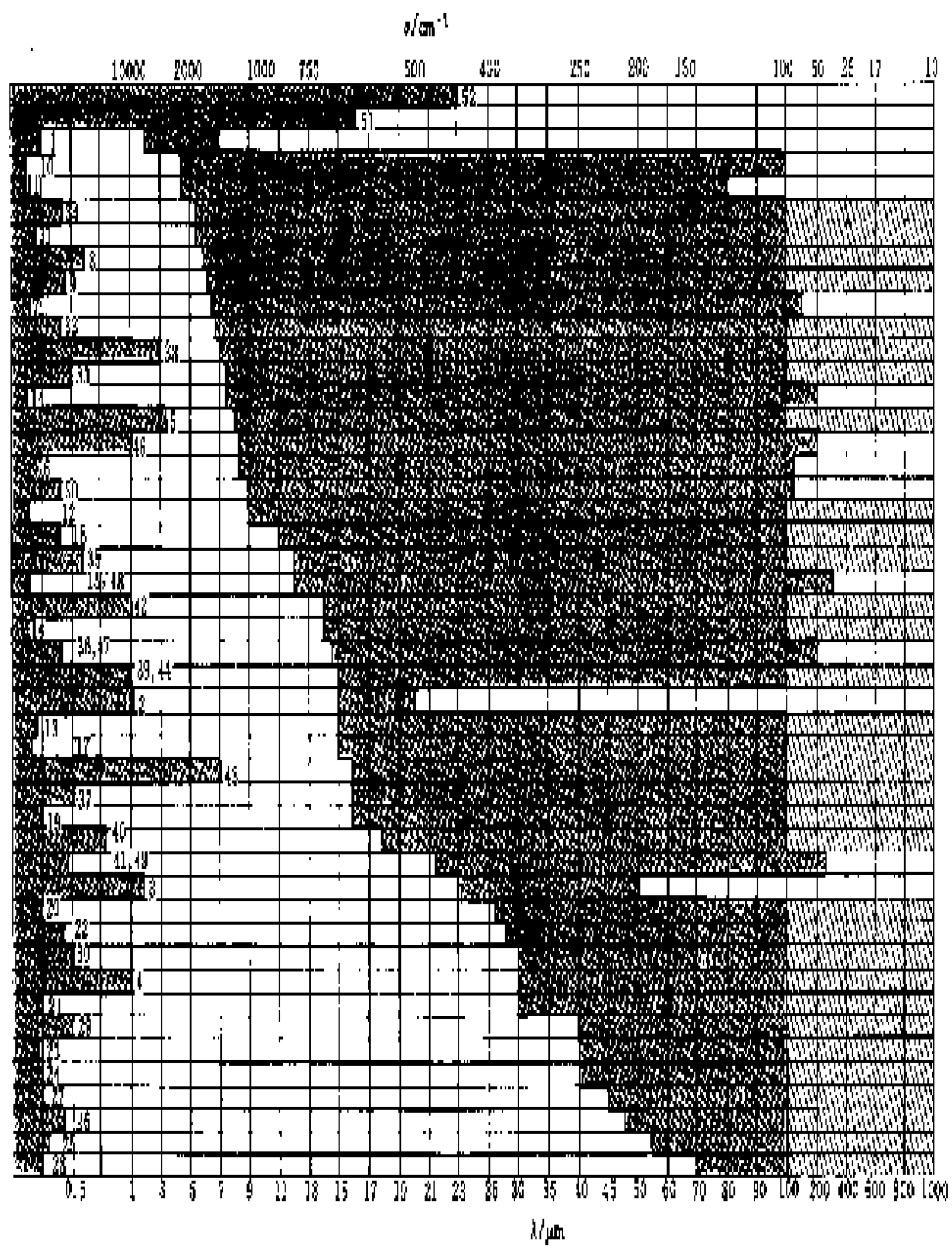


图 18.3 各种材料的红外透光范围

图 18-4 给出了一些窗片材料在远红外光区的透射光谱，可以看出几种晶体窗片中透光性能最好的是碘化铯，所以可以用碘化铯晶体粉末作固体样品稀释剂。硅晶片在整个远红外光区是透明的。高密度聚乙烯窗片在 470cm^{-1}和 170cm^{-1}附近有宽的吸收峰。碘化铯晶片可测 (500～200) cm^{-1}之间的光谱。

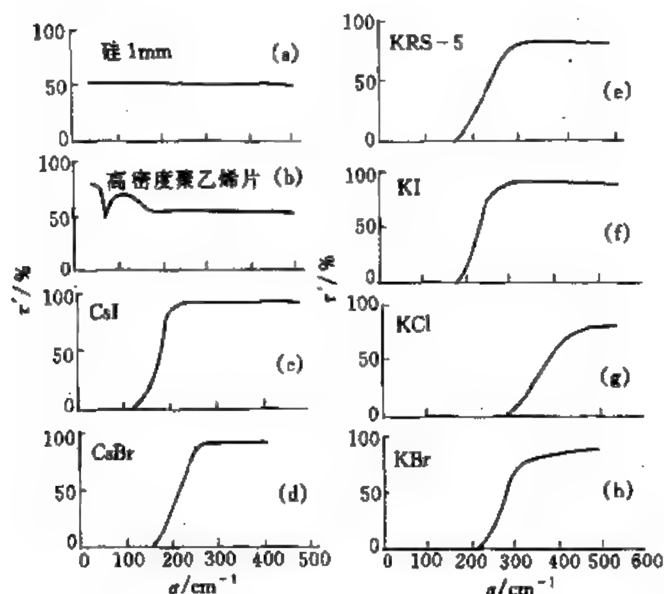


图 18-4 几种远红外窗片材料的透射光谱[10]

(a) Si 片；(b) 高密度聚乙烯片；(c) CsI；(d) CsBr；(e) KRS-5；(f) KI；(g) KCl；(h) KBr

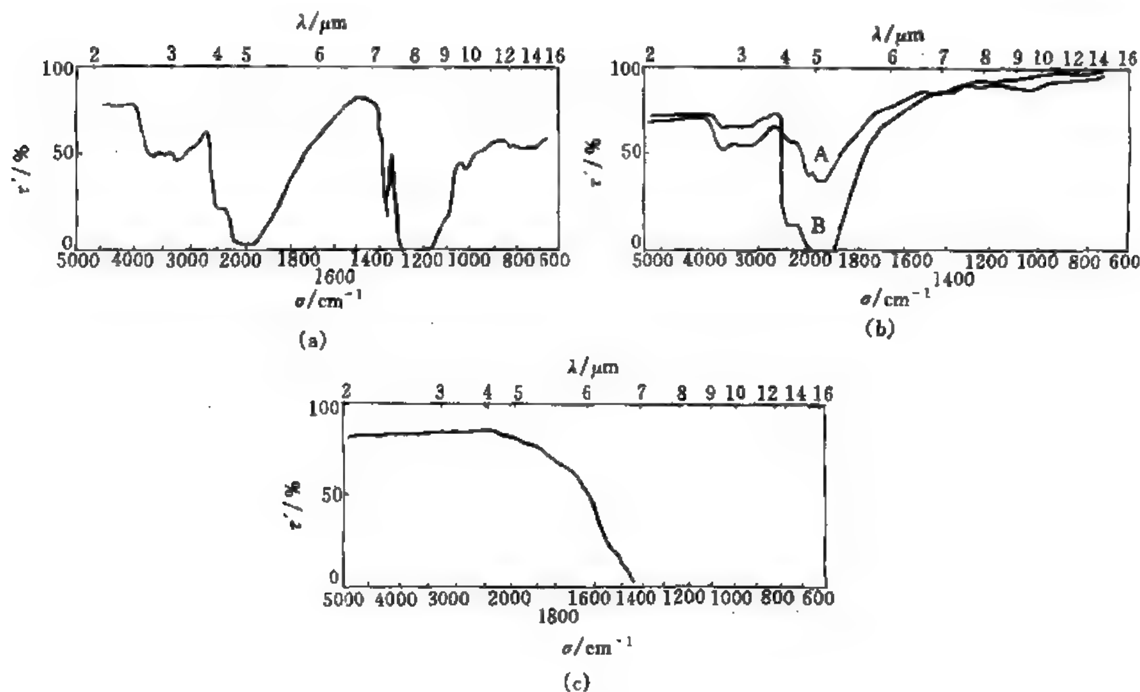


图 18-5 Ⅰ、Ⅱ型金刚石和蓝宝石的红外吸收光谱图[10]

(a) 金刚石Ⅰ型；(b) 金刚石Ⅱ型；(c) 蓝宝石

耐高压的红外透光材料中金刚石是最好的材料，金刚石材料分Ⅰ型和Ⅱ型两种，其红外吸收光谱如图18-5所示。Ⅱ型金刚石在中红外区对测定干扰小，Ⅱ型金刚石中还分为$Ⅱ_a$型与$Ⅱ_b$型。$Ⅱ_a$型除在3μm和（4～5.5）μm处有吸收外，直至$10cm^{-1}$远红外都是透光的，而$Ⅱ_b$型在（3～5.5）μm和7.7μm有很强吸收。蓝宝石能在中红外区（2～6μm）取代金刚石，在温度低于70K时，蓝宝石还可用于远红外区。

当用压片法制样时，固相分散剂若与样品折射率相差较大，由于克里斯蒂森(Christiansan)效应使压片测得的红外光谱产生谱峰的位移和变形。因此固体样品测谱中要选用折射率尽可能与样品折射率接近的分散剂。如果找不到折射率相近的分散剂，应磨碎样品使粒度与入射光波长相当(2～3μm)，以减小散射损失。红外光学材料折射率在一定温度下与波长的关系见表18-5。

三、红外光谱分析常用溶剂

固体和液体样品均可选用合适的溶剂配成溶液进行红外光谱定性和定量分析。在选用溶剂时，一般要考虑：①溶质应有较大的溶解度；②与溶质不发生明显的溶剂效应；③在被观测的区域内，溶剂应透明或只有弱的吸收，其次要求沸点低，易于清洗等。能满足上述要求的溶剂大多是分子组成简单的化合物。

表18-5 红外光学材料折射率与波长关系表[17]

λ/μm	折射率	λ/μm	折射率	λ/μm	折射率	λ/μm	折射率	λ/μm	折射率
氯化钡	25℃	4.0	1.66813	19.0	1.72913	2.1526	1.73444	6.692	1.53225
0.2534	1.5122	5.0	1.66737	21.0	1.72602	2.4374	1.72783	9.724	1.52695
0.28035	1.5067	6.0	1.66659	23.0	1.72258	3.3026	1.70231	11.862	1.52200
0.34662	1.4916	7.0	1.66573	25.0	1.71880	3.7067	1.68746	14.98	1.51280
0.54607	1.4759	8.0	1.66477	27.0	1.71465	4.954	1.62665	18.16	1.50076
1.01398	1.4685	9.0	1.66370	29.0	1.71014	5.349	1.60202	19.01	1.49703
1.52952	1.4662	10.0	1.66251	31.0	1.70525	5.577	1.58638	23.86	1.47140
2.1526	1.4641	11.0	1.66120	33.0	1.69996	氯化钾		氟化锂	
2.576	1.4626	12.0	1.65976	35.0	1.69427	0.200090	1.71870	0.21	1.4346
3.2434	2.4602	13.0	1.65820	37.0	1.68815	0.410185	1.50907	0.80	1.38896
3.7067	1.4588	14.0	1.65651	39.0	1.68159	0.88398	1.481422	1.50	1.38320
5.138	1.4501	15.0	1.65468	41.0	1.67457	1.1786	1.478311	2.00	1.37875
5.343	1.4488	17.0	1.65062	43.0	1.66707	1.7680	1.475890	2.50	1.37327
6.16	1.4436	19.0	1.64600	45.0	1.65905	2.9466	1.473834	3.00	1.36660
9.724	1.4209	21.0	1.64080	47.0	1.65051	4.7146	1.471122	4.00	1.34942
11.035	1.4142	23.0	1.63500	49.0	1.64139	5.8932	1.468804	5.00	1.32661
氟化钙	24℃	25.0	1.62855	熔融石英	20℃	8.2505	1.462726	6.00	1.29745
1.01398	1.42879	27.0	1.62145	0.894350	1.451835	10.0184	1.45672	8.05	1.215
1.52952	1.42612	29.0	1.61365	1.12866	1.448869	12.965	1.44346	9.18	1.155
2.1526	1.42306	31.0	1.60510	1.39506	1.445836	14.144	1.43722	氯化银	23.9℃
2.4374	1.42147	33.0	1.59575	1.6606	1.442670	17.680	1.41403	0.5	2.09648
3.3026	1.41561	35.0	1.58558	1.81307	1.440699	18.8	1.401	0.8	2.03485
3.7067	1.41229	37.0	1.57450	2.0581	1.437224	20.4	1.389	1.0	2.02239
4.258	1.40713	39.0	1.56245	2.4374	1.430954	22.2	1.374	1.5	2.01047
5.3034	1.39520	碘化铯	24℃	3.422	1.408180	24.1	1.352	2.0	2.00615
6.0140	1.38539	1.0	1.75721	3.7067	1.399389	25.7	1.317	2.5	2.00386
6.8559	1.37186	3.0	1.74400	蓝宝石 Al_2O_3		28.2	1.254	3.0	2.00230
7.268	1.36443	5.0	1.74239	0.30215	1.81351	溴化钾	22℃	3.5	2.00102
8.662	1.33500	7.0	1.74122	0.64385	1.76547	0.404656	1.589752	4.0	1.99983
9.724	1.30756	9.0	1.73991	0.85212	1.75885	0.706520	1.552447	5.0	1.99745
溴化铯	27℃	11.0	1.73835	1.12866	1.75339	1.36728	1.54061	6.0	1.99483
1.0	1.67793	13.0	1.73650	1.52952	1.74660	2.44	1.53733	7.0	1.99185
2.0	1.67061	15.0	1.73436	1.81307	1.74144	3.419	1.53612	9.0	1.98464
3.0	1.66901	17.0	1.73190			4.258	1.53523	11.0	1.97556

续表

λ/μm	折射率	λ/μm	折射率	λ/μm	折射率	λ/μm	折射率	λ/μm	折射率
13.0	1.96444	14.7330	1.45427	1.5000	1.3749	12.000	2.1688	6.000	2.428
15.0	1.95113	17.93	1.4149	2.000	1.3720	13.000	2.1508	7.000	2.423
17.0	1.93542	22.3	1.3403	2.5000	1.3683	Irtran 3		8.000	2.418
20.0	1.90688	溴-碘化铊 KRS-5	25℃	3.0000	1.3640	1.5000	1.4263	9.000	2.413
氯化钠	20℃			4.0000	1.3526	2.0000	1.4239	10.000	2.407
0.589	1.54427	1.00	2.44620	5.0000	1.3374	2.5000	1.4211	11.000	2.401
1.0084	1.53206	2.00	2.39498	6.0000	1.3179	3.0000	1.4179	12.000	2.394
1.2016	1.53014	4.00	2.38204	7.0000	1.2934	4.000	1.4097	14.000	2.378
1.5552	1.52815	6.00	2.37797	8.0000	1.2634	5.000	1.3990	16.000	2.361
2.0736	1.52649	8.00	2.37452	9.0000	1.2269	6.000	1.3856	18.000	2.343
2.2464	1.52606	10.0	2.37069	Irtran 2		7.000	1.3693	20.000	2.323
2.9466	1.52466	12.0	2.36622	1.5000	2.2706	8.000	1.3498	Irtran 5	
3.5359	1.52312	14.0	2.36101	2.0000	2.2631	9.000	1.3269	1.5000	1.7156
4.1230	1.52156	16.0	2.35502	2.5000	2.2589	10.000	1.3073	2.000	1.7089
5.0092	1.51883	18.0	2.34822	3.0000	2.2558	11.000	1.3002	2.5000	1.7012
5.8932	1.51593	20.0	2.34058	4.0000	2.2504	12.000	1.2694	3.000	1.6920
6.80	1.51200	22.0	2.33206	5.0000	2.2447	Irtran 4		4.000	1.6683
7.22	1.51020	24.0	2.32264	6.0000	2.2381	1.5000	2.456	5.000	1.6368
8.04	1.5064	26.0	2.31229	7.0000	2.2304	2.000	2.447	6.000	1.5962
9.00	1.5010	28.0	2.30098	8.0000	2.2213	2.500	2.442	7.000	1.5452
10.0184	1.49462	30.0	2.28867	9.0000	2.2107	3.000	2.440	8.000	1.4824
12.50	1.47568	32.0	2.27531	10.0000	2.1986	4.000	2.435	9.000	1.4060
13.50	1.4666	Irtran 1		11.000	2.1846	5.000	2.432		

近红外波段所用溶剂见图 18-6。

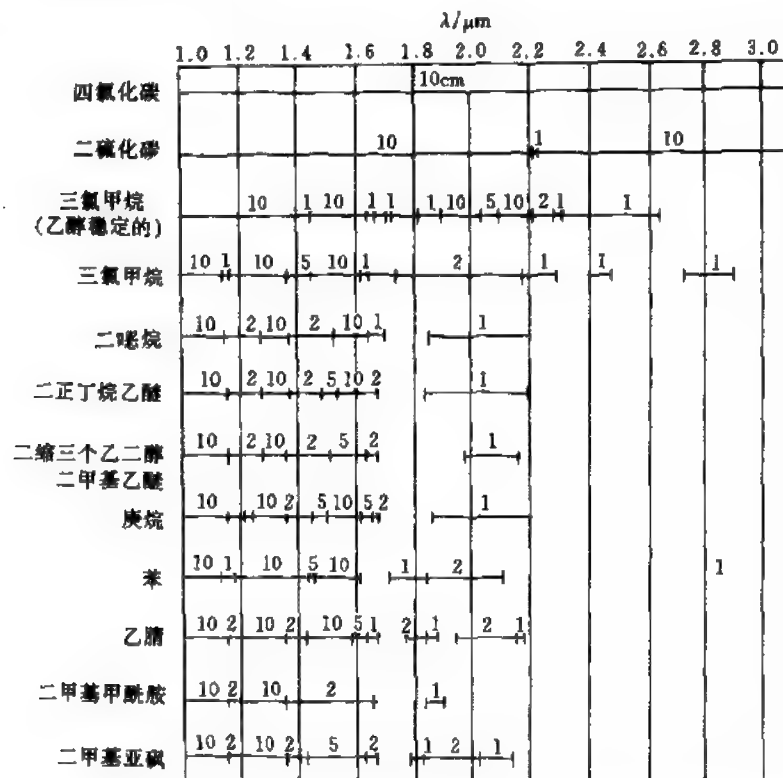


图 18-6 近红外波段溶剂[17]

实线表示近红外光谱的有用范围；线条上数字表示最大液层厚度 (cm)。在近红外光区内透明的溶剂只有 CCl_4 和 CS_2。

中红外波段所用溶剂见图 18-7。

中红外波段常用溶剂的红外吸收光谱见图 18-8～图 18-23[9]。

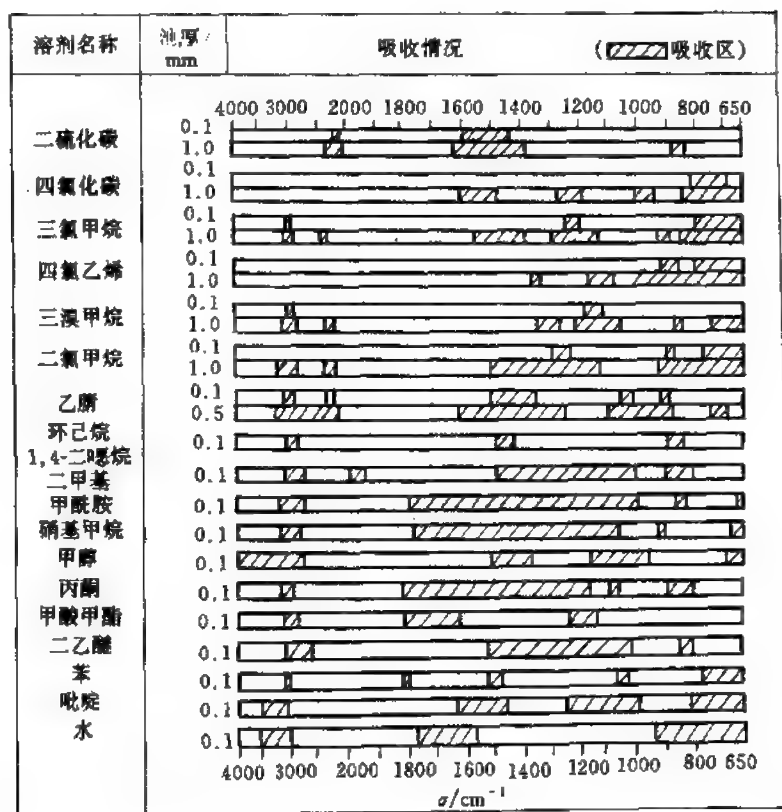


图 18-7 中红外波段溶剂[17]

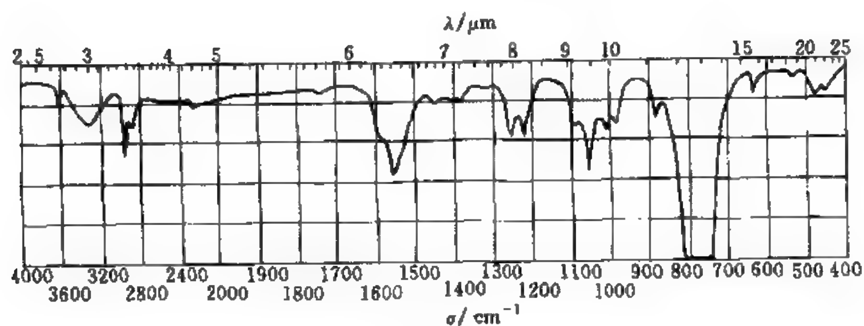


图 18-8 CCl_4

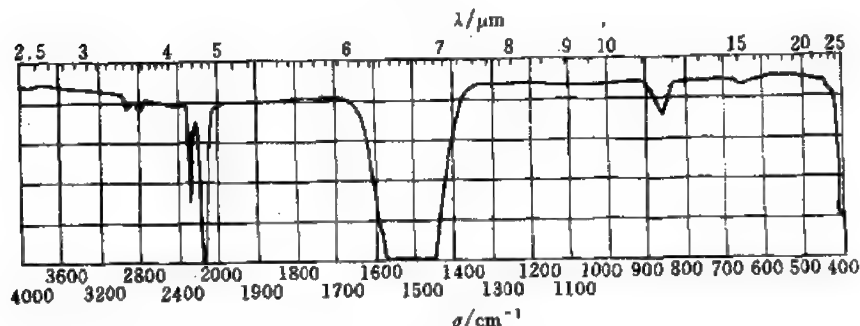


图 18-9 CS_2

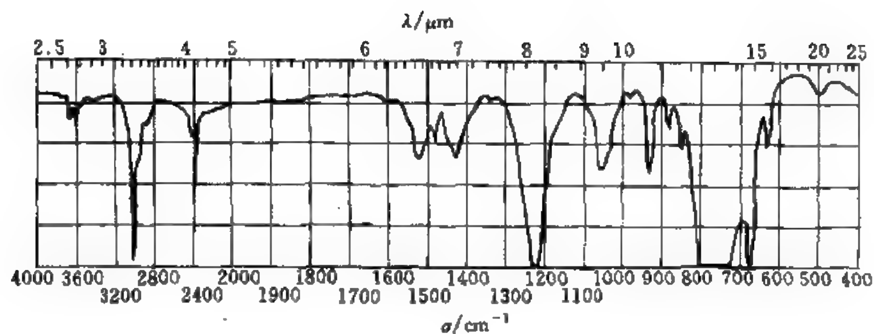


图 18-10　$CHCl_3$

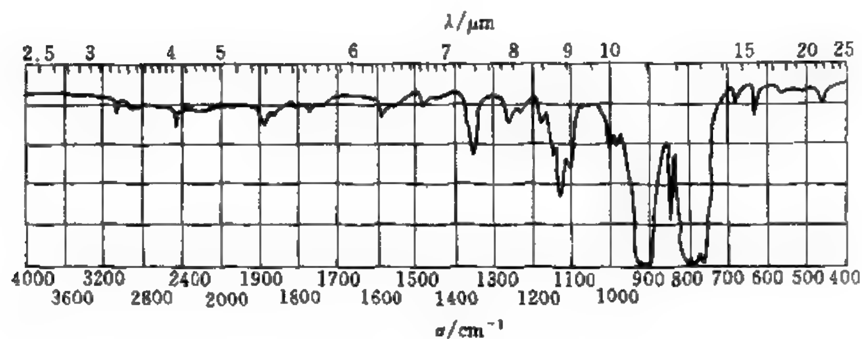


图 18-11　$CCl_2{=\!=}CCl_2$

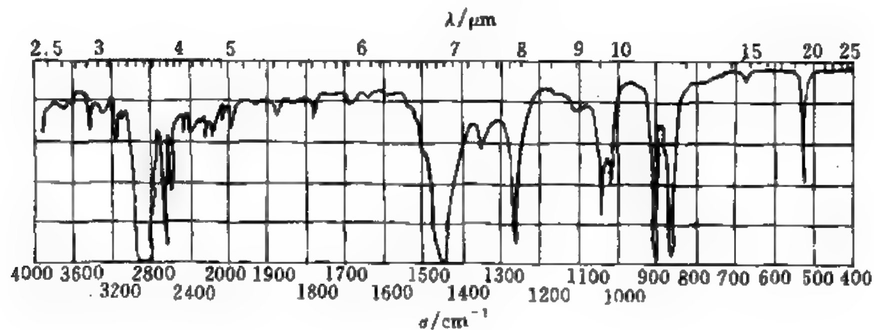


图 18-12　环己烷

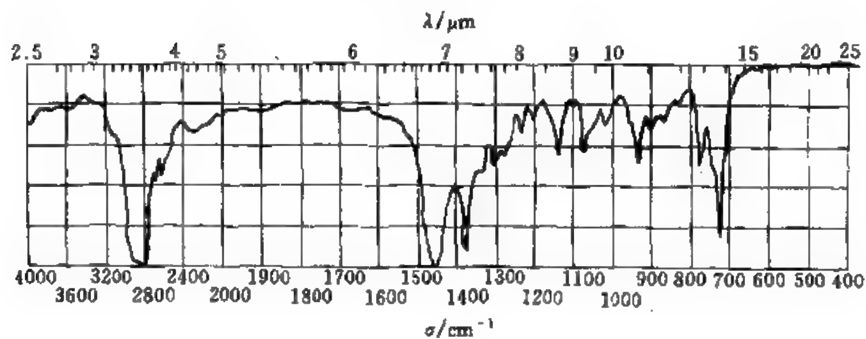


图 18-13　正庚烷

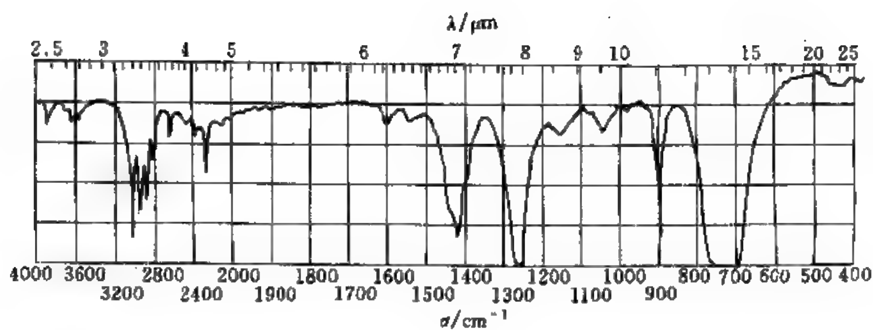


图 18-14　CH_2Cl_2

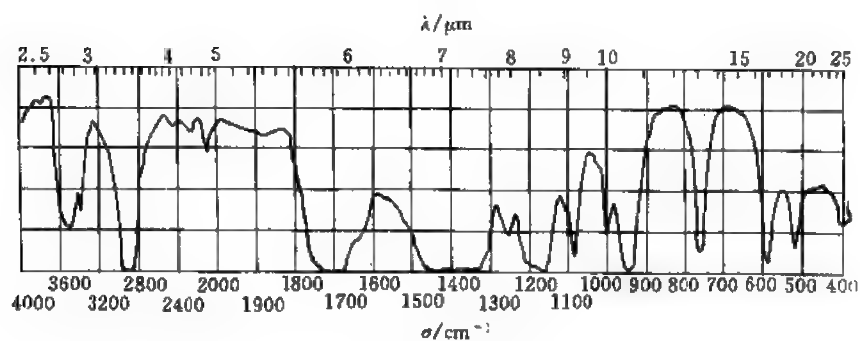


图 18-15　甲乙酮

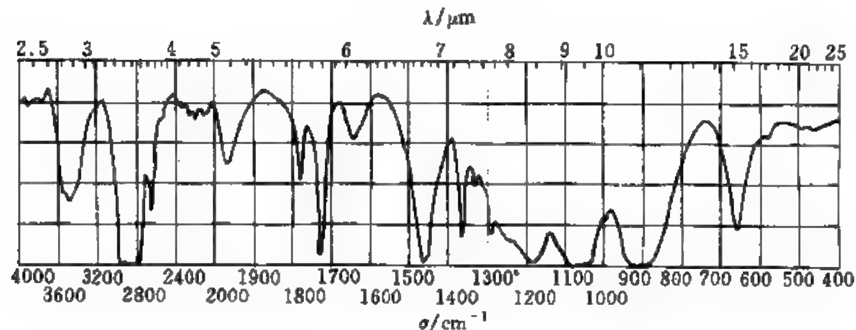


图 18-16　四氢呋喃

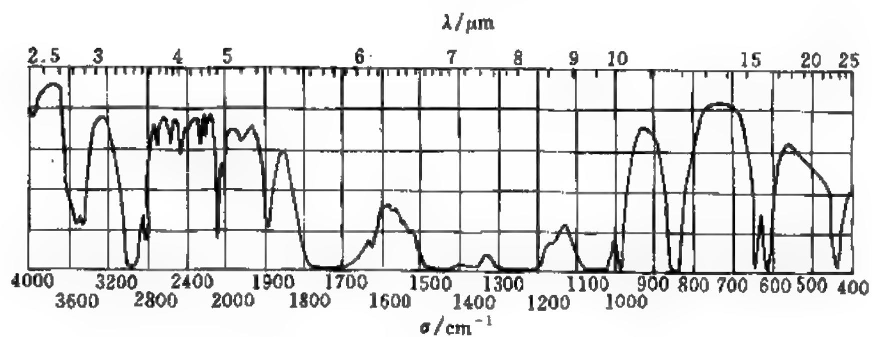


图 18-17　乙酸甲酯

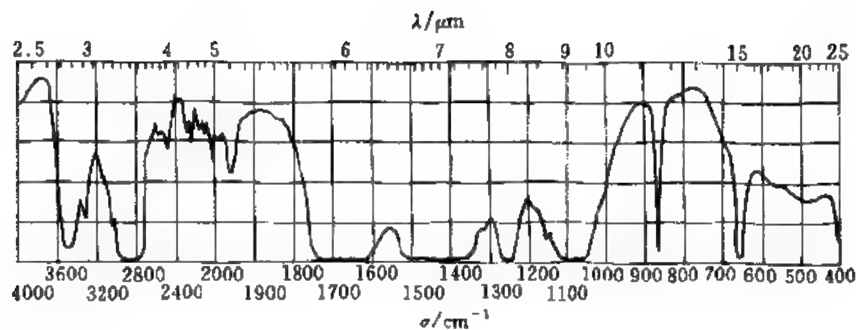


图 18-18 二甲替甲酰胺

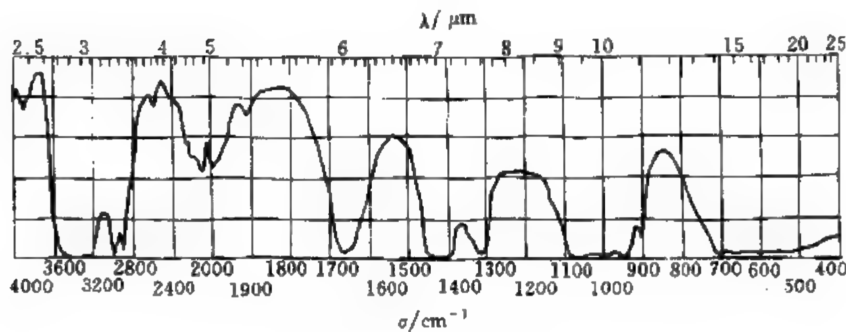


图 18-19 二甲亚砜

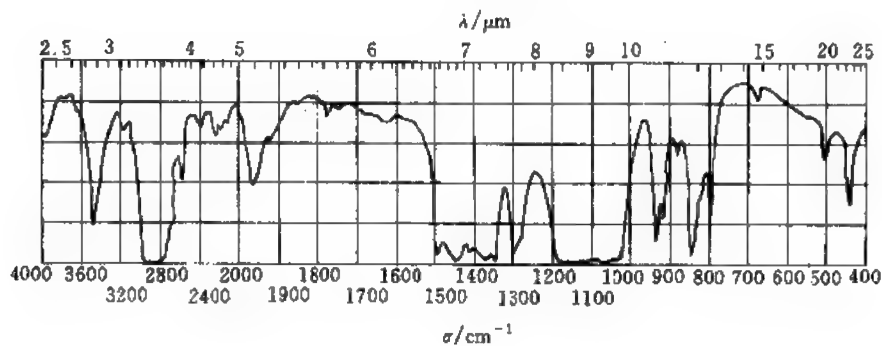


图 18-20 乙醚

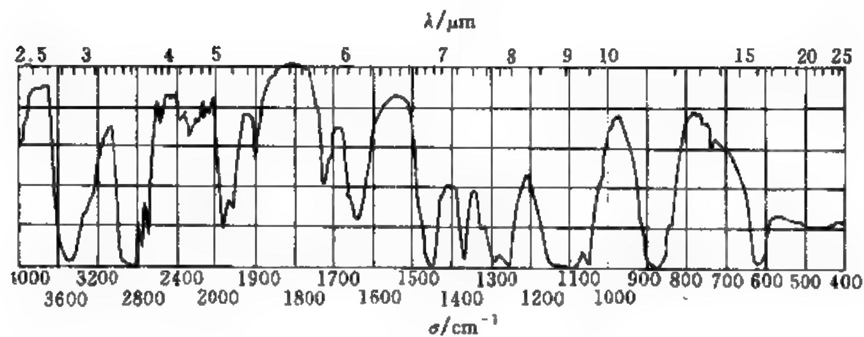


图 18-21 二氧六环

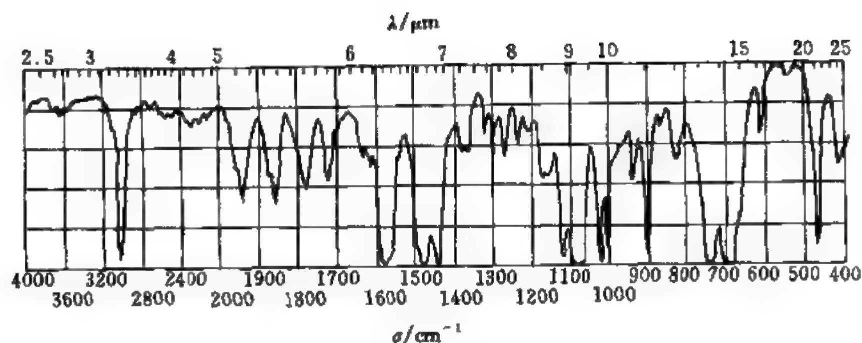


图 18-22　氯苯

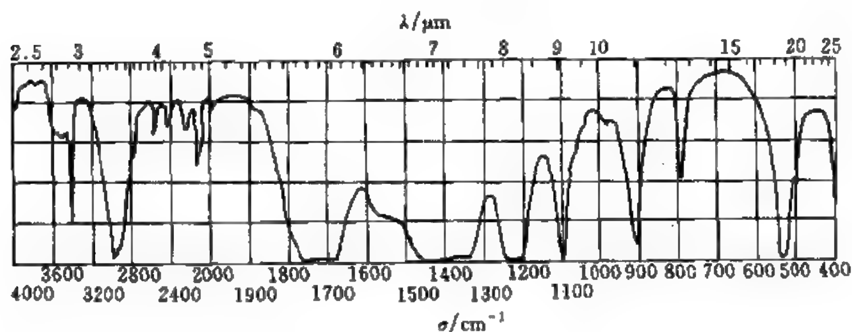


图 18-23　丙酮

远红外波段所用溶剂见图 18-24。

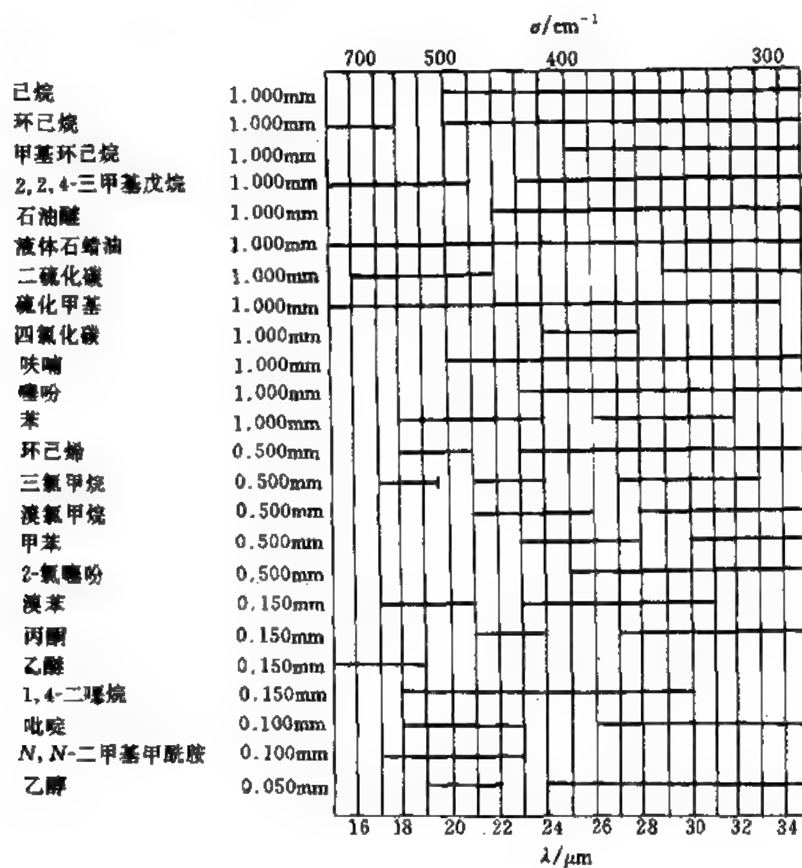


图 18-24　远红外波段溶剂[17]

黑线表示溶剂的有用范围。比较理想的溶剂是正已烷和环己烷。不管使用哪种溶剂，最好用差减法把溶液光谱中的溶剂吸收峰减掉。图 18-25 给出 10 种常用溶剂的远红外吸收光谱[10]。

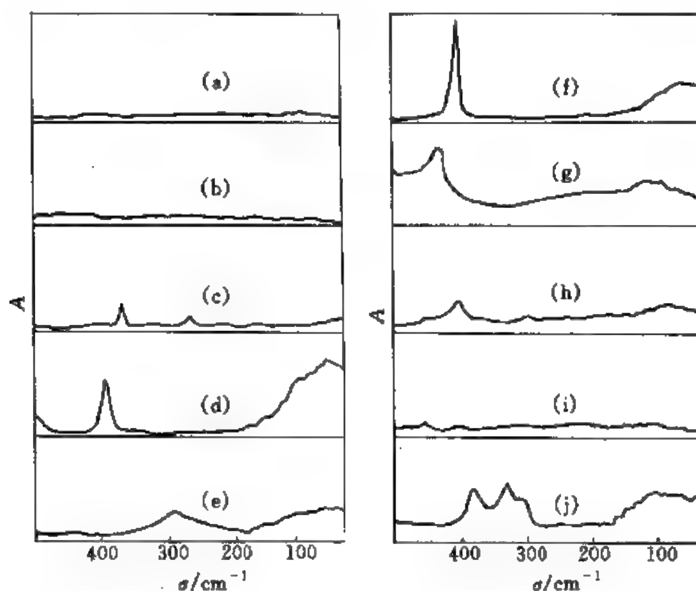


图 18-25 10 种常用溶剂的远红外吸收光谱（σ=500~300cm^{-1}，A=0~1.4）
(a) 环乙烷（1.0mm）；(b) 石油醚（1.0mm）；(c) 氯仿（200μm）；(d) 丙酮（100μm）；
(e) 四氢呋喃（200μm）；(f) 吡啶（200μm）；(g) 乙醇（100μm）；(h) 苯（1.0mm）；
(i) 正乙烷（1.0mm）；(j) 二甲基亚砜（200μm）

在糊状法制样时，当分散液与样品的折射率相差较远，则入射光在样品粒子上散射严重，特别是在样品有强而尖锐的吸收峰波长上，折射率变化剧烈，散射的能量损失严重，导致峰形畸变，峰形偏移，这就是在压片法中同样存在的克里斯蒂森效应。糊状法制样时常用的溶剂有石蜡油、氟油或全氟煤油、六氯丁二烯等。石蜡油结合氟油或六氯丁二烯等的使用可观察样品的红外全信息。石蜡油和氯化石蜡油的光谱见图 18-26，图 18-27 所示。

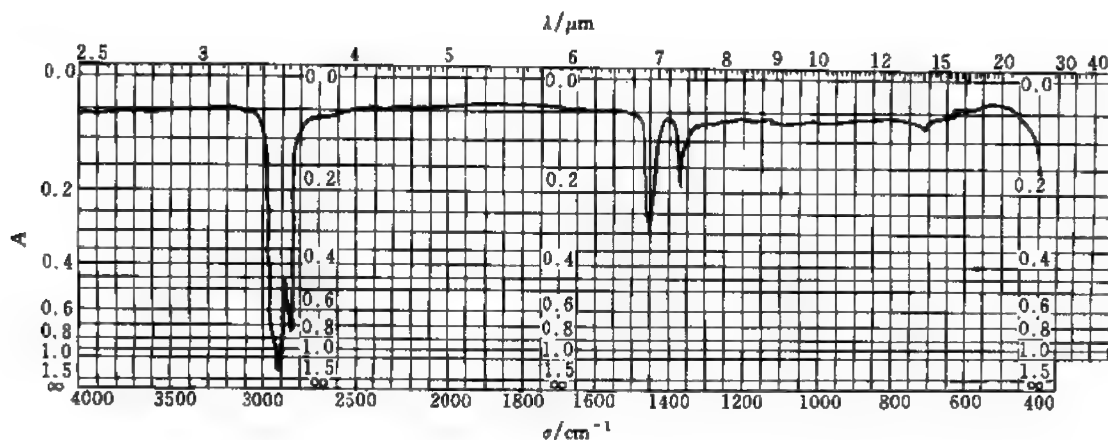


图 18-26 液体石蜡油——在 KBr 上涂膜[37]

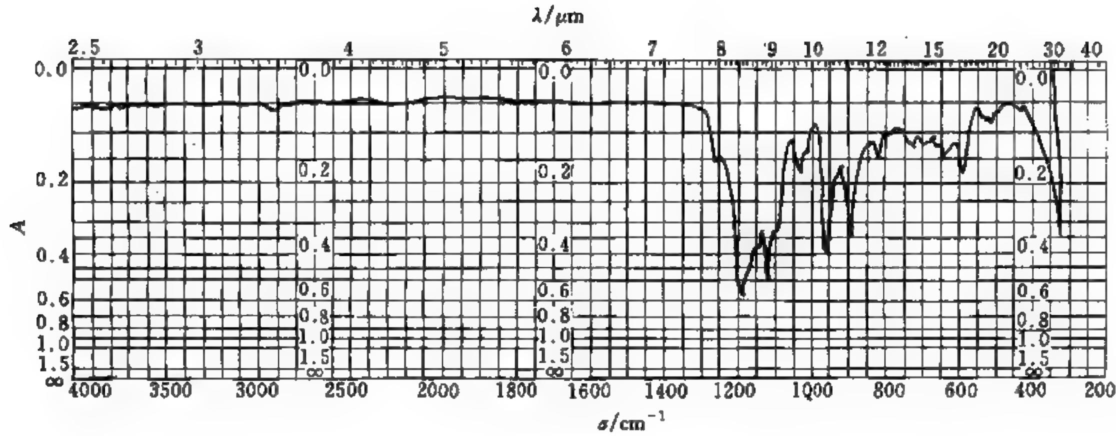


图 18-27 氯化石蜡油——在 KBr 上涂膜[17]

第三节 红外光谱仪

自 1908 年 Coblentz 设计出氯化钠棱镜的红外光谱仪后，90 年来红外光谱仪得到了飞速的发展。至今，已发展了三代，第一代是棱镜色散型红外光谱仪。60 年代以后，分光元件从棱镜逐步发展到红外光栅，出现了第二代光栅型色散式红外光谱仪。70 年代中期计算机控制的色散型红外光谱仪（Computerised dispersive infrared spectroscopy，CDS）问世，使数据处理和操作更为简便。同期，作为第三代的干涉型红外光谱仪——FTIR 谱仪开始投入市场，但因价格昂贵无法与低价的色散型仪器匹敌。随着计算机技术发展，很多低价高性能产品推出，到 80 年代中期逐渐取代了色散型红外光谱仪。国际上大多数厂家全面转入生产 FTIR 谱仪，目前 FTIR 谱仪已向全功能型仪器方向发展。

一、红外光谱仪结构概述

色散型红外分光光度计按测光方式的不同，可以分为光学零位平衡式与比例记录式两类。光学零位平衡式的结构方框图见图 18-28[19]。

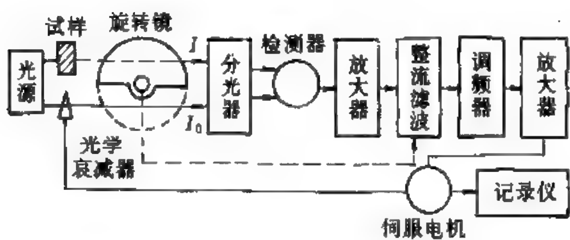


图 18-28 光学零位平衡式

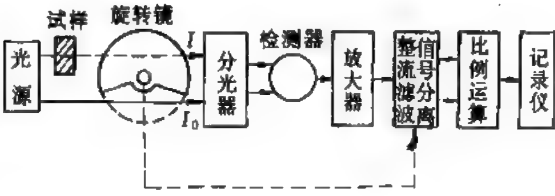


图 18-29 比例记录式

光学零位平衡式仪器是把调制光信号（$I_0 \sim I$）经检测与放大后，用以驱动参比光路上的光学衰减器，使两束光的能量达到零位平衡。同时记录仪与光学衰减器同步运动以记录样品的透射比。

比例记录式的结构方框图见图 18-29[19]。

比例记录式仪器是把调制光信号（$I\to$零$\to I_0\to$零）经检测与放大后分离。通过测量两个电信号的比例而得出样品的透射比。

FTIR 光谱仪的干涉仪结构与功能示意图见图 18-30[10]。

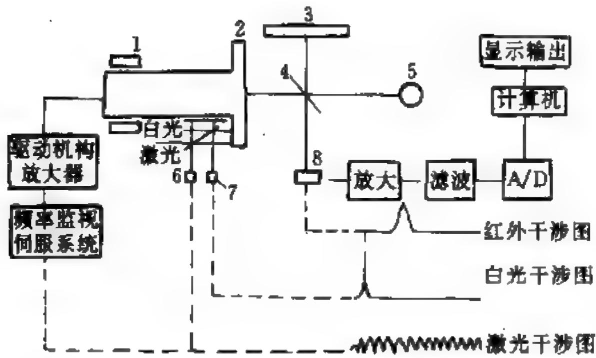


图 18-30 FTIR 光谱仪的干涉仪结构与功能示意图

1—动镜驱动机构；2—动镜；3—定镜；4—分束器；5—光源；6—激光检测器；7—白光检测器；8—红外检测器

FTIR 光谱仪由光学系统，电子电路，计算机数据处理、接口和显示系统等部分组成。

光学系统由固定镜、移动镜、分束器组成的主干涉仪和激光干涉仪、白光干涉仪、光源、检测器以及各种红外反射镜组成。主干涉仪用于获得样品干涉图，激光干涉仪用于实现主干涉图的等间隔取样，动镜速度和移动距离的监控。白光干涉仪以保证每次扫描在同一过零点开始取样（近年来新型仪器都取消了白光干涉仪，采用激光回扫相位差来确定采样初始位置）。电子电路的主要任务是把检测器得到的信号经放大器、滤波器处理后送到计算机接口，再经处理后送至计算机数据处理系统。另一功能是按键盘输入指令对干涉仪动镜运动，光源，检测器，分束器的调整更换进行控制，以实现自动操作。计算机通过接口与光学测量系统的电路相连，把测量的模拟信号转变为数字信号，在计算机内进行运算处理，把计算结果输给显示器，绘图仪及打印机。计算机系统一般具有 20～32 位字节，1～8MB 的存贮器，40～525MB 存贮容量的硬盘作外存，用阵列处理器加快运算速度。

二、红外光谱仪的基本部件

（一）光源

每种光源只能覆盖一定的波段，故红外的全波段测量常需几种光源，常用的光源如表 18-6 所示。

表 18-6 红外光谱仪常用光源[10]

光源	使用波数范围 σ/cm^{-1}	主要性能
钨灯	15000～4000（近红外）	能量高、寿命长、稳定性好
卤钨灯	15000～4000（近红外）	同钨灯
Nernst 棒	4000～400（中红外）	以氧化锆为主体，加有 15%钇和钍等稀土金属氧化物的棒状体，工作温度（1400～2000）K，辐射强度集中在短波长处，在（5000～1666）cm^{-1}处发射系数为 0.8～0.9，具有较长的寿命（约 2000h）
硅碳棒	4000～400（中红外）	能量高，功率大，工作温度（1300～1500）K，热辐射强，使用寿命很长，需通冷却水冷却
金属丝光源	4000～400（中红外）	小功率，风冷却
金属陶瓷棒	4000～400（中红外）	大功率，1550K，120mW，风冷却，寿命长
EVER-GLO 光源	4000～400（中红外）	大功率，低热辐射，1525K，150mW，风冷却

下降为 1×10^{-3}，在 50cm^{-1}时为 5×10^{-7}。因此在测量 50cm^{-1}以下低频波段的远红外光谱应采用高压汞弧灯光源，现生产的高能量高压汞弧灯光源发射的远红外辐射能覆盖整个远红外区，该灯还发射出极强的紫外和可见光，测量时需选用合适的黑色聚乙烯滤光片，以除去紫外和可见光的干扰。高压汞弧灯使用寿命仅 200h，在测量（650～100）cm^{-1}的远红外光谱时，尽量使用中红外光源。

（二）单色器

色散型红外分光光度计中单色器的作用是将辐射光分散成单色光。单色器通常是指从入射狭缝开始至出射狭缝射出单色光的部分，其结构和紫外-可见分光光度计相同，但采用的棱镜材料不同。红外分光光度计中目前大多采用闪耀光栅，在进行光谱级次分离时可用滤光片或棱镜。滤光片采用截止或通带透射滤光片。常用红外区棱镜材料的最适宜的波长范围参见表 18-4。一些短波长截止透射式滤光片的截止短波界限见表 18-7。

表 18-7　短波长截止滤光片[9]

透过滤光片	截止短波界限 σ/cm^{-1}
硅 Si	10000
锗 Ge	6400
砷化铟 InAs	2650
锑化铟 InSb	1300

（三）干涉仪

在傅里叶变换红外光谱仪中，首先是把光源发出的光经迈克尔逊干涉仪变成干涉光，经典干涉仪是由定镜、分束器和动镜及动镜驱动机构等部分组成。

各类分束器覆盖的波段范围见图 18-31[10]。

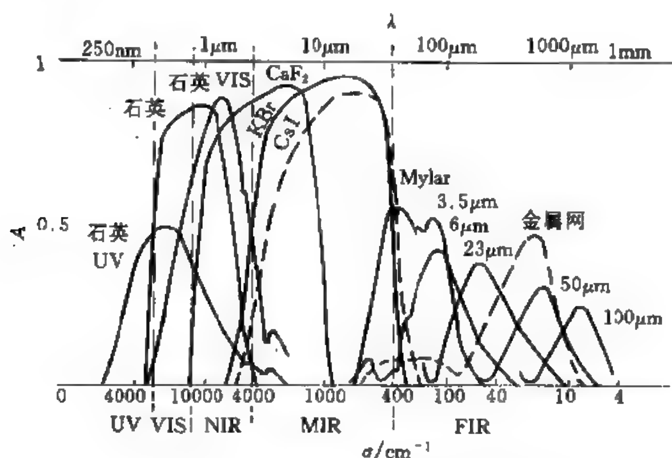


图 18-31　各类分束器覆盖的波段范围

近几年来干涉仪在不断地改进与发展，在干涉仪的简化，提高光的利用率，增加光程差提高分辨率，增加仪器稳定性，测量波段的延长和干涉仪的自动调整，干涉仪的防护，高速扫描和步进扫描技术等方面都有很大的进展。

（四）检测器

在红外分光光度计中常用的检测器是真空热电偶和高莱池。FTIR 光谱仪中常用的检测器有：通用型热释电检测器，目前有四类：TGS（硫酸三苷肽 $(NH_2CH_2COOH)_3\cdot H_2SO_4$）、LATGS（L-丙氨酸 TGS）、DLATGS（氘化 L-丙氨酸 TGS）、DTGS（氘化 TGS）；高灵敏快速响应检测器，MCT 检测器，是由宽频带的半导体碲化镉和半金属化合物碲化汞混合成的。其组成为 $Hg_{1-x}Cd_xTe$（$x=0.2$）；常用的近红外检测器为锑化铟（InSb）检测器，有光电导型和光

伏型；远红外检测器常用带聚乙烯窗口的 DTGS 和液氦冷却的电阻式量热辐射计（He-Cooled Bolometer）。

各类常用探测器的类型、工作温度，适用波长和探测率 D 见表 18-8。

表 18-8 FTIR 谱仪中常用的探测器

名　　称	类　型	工作温度/K	适用 σ/cm^{-1}	探测率 $D/(\mathrm{cm}\cdot\mathrm{Hz}^{1/2}\cdot\mathrm{W}^{-1})$
DTGS（带 KBr 窗口）	热电型	295	5000～400	1.8×10^{9}
DTGS（带 CsI 窗口）	热电型	295	5000～200	1.8×10^{9}
DTGS（带 KRS-5 窗口）	热电型	295	5000～200	1.8×10^{9}
DTGS（带聚乙烯窗口）	热电型	295	400～10	1.8×10^{9}
MCT-A	光电导型	77（液氮）	5000～720	2×10^{10}
MCT-B	光电导型	77（液氮）	5000～400	2×10^{10}
InSb	光电型	77（液氮）	10000～1850	1×10^{11}
PbSe	光伏型	195 或 77	10000～2000	
InAs	光电导型	77（液氮）	10000～3500	
Si	P-N 结	259	25000～8000	
氦冷电阻式测热辐射计	电阻式	4（液氦）	500～10	
InSb/MCT	复合式			

各类检测器对调制频率的响应和覆盖的波段及检出相对灵敏度见图 18-32[10]和图 18-33[10]。为了综合比较光源、分束器、检测器的覆盖波段，将其综合画于图 18-34[10]中。

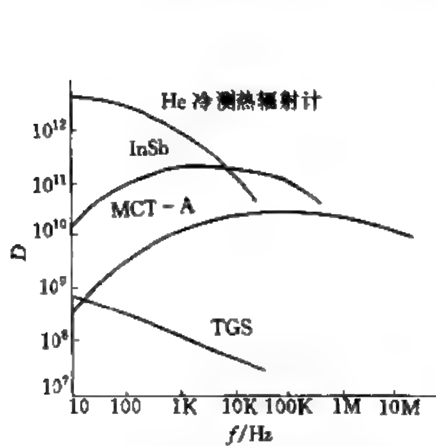


图 18-32 各类检测器对调制频率的响应

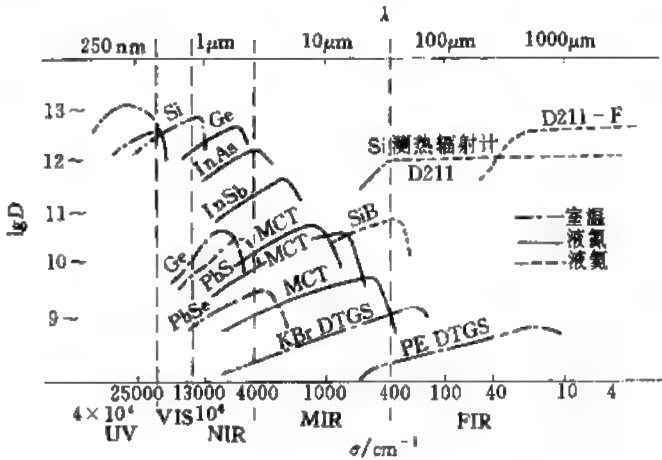


图 18-33 各种检测器覆盖的波段和检出相对灵敏度

三、色散型红外分光光度计检定规程[19]

国家计量检定规程 JJG 681—90 规定了色散型红外分光光度计检定规程，现将其主要内容摘录如下，仪器按波数范围不同，可以分为 A、B、C 三类，见表18-9。

表 18-9 仪器分类

类 别	σ/cm^{-1}
A	4000～650
B	4000～400
C	4000～200

（一）技术要求

①仪器应有下列标志：仪器名称，型号，制造厂名，出厂年、月和仪器编号；新出厂的仪器应有制造厂的出厂合格证。

②仪器的各紧固件均应紧固良好，各调节旋钮、开关均能正常工作。

③仪器不应有挡光和耀光现象。仪器的所有刻线与刻字应清晰、均匀，不应有妨碍读数的锈蚀及划痕。

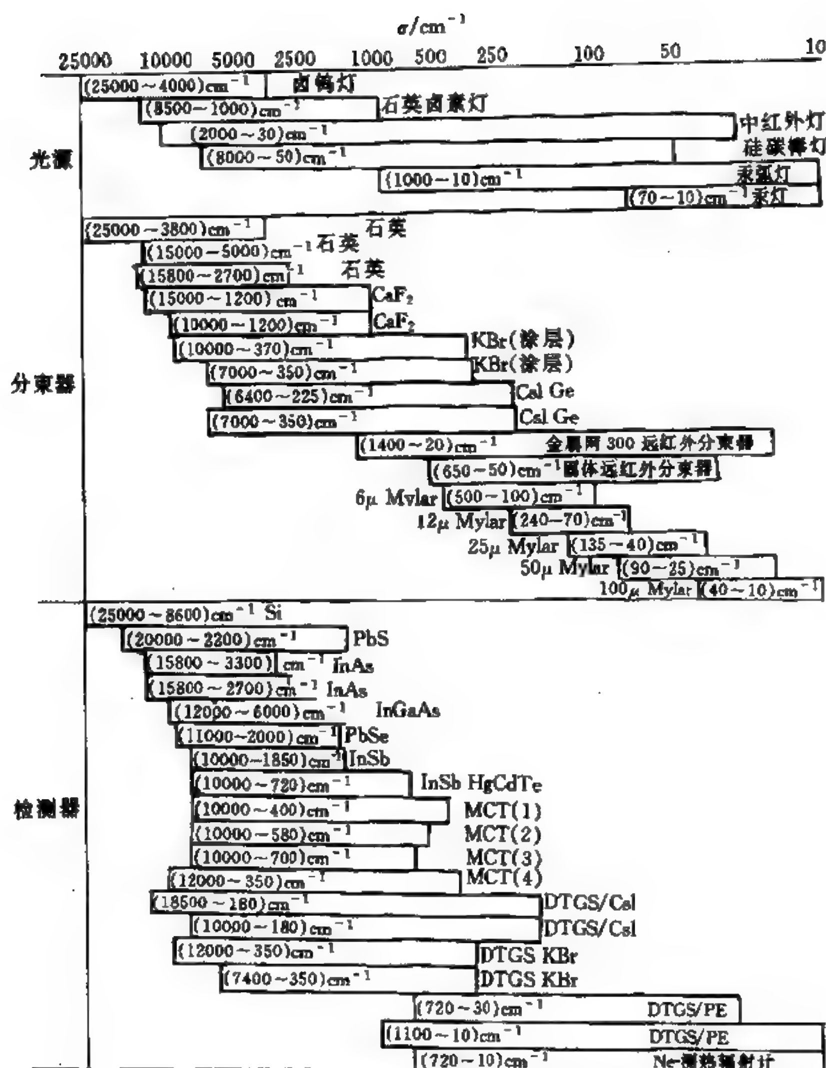


图 18-34 FTIR 光源分束器、检测器的种类和覆盖波段范围

表 18-10 各项技术要求指标

项目	要求
横坐标分度值	2000 cm⁻¹以上≤50cm⁻¹ 2000 cm⁻¹以下≤20cm⁻¹
纵坐标分度值（透射比）	≤1%
波数正确度	4000～2000：≤±8cm⁻¹ 2000 以下：≤±4cm⁻¹
波数重复性	4000～2000：≤8cm⁻¹ 2000 以下：≤4cm⁻¹
透射比正确度	光学零位平衡式：≤1.0%(15%～95%τ)，≤1.5%(其余) 比例记录式：≤0.5%
透射比重复性	光学零位平衡式：≤1.0% 比例记录式：≤0.5%

项目		要求	
杂散辐射	A类	4000～680	≤1%
		680～650	≤2%
		650～400	—
		400～300	—
		300～200	—
	B类	4000～680	≤1%
		680～650	≤1%
		650～400	≤2%
		400～300	—
		300～200	—
	C类	4600～680	≤1%
		680～650	≤1%
		650～400	≤1%
		400～300	≤2%
		300～200	≤3%
分辨率	A	3027cm⁻¹与 3000cm⁻¹分辨深度≥1%	951.8cm⁻¹与 948.2 cm⁻¹分辨深度≥1%
	B和C	3103cm⁻¹与 3082cm⁻¹分辨深度≥1%	
100%线平直度		≤4%	
噪声		≤1%	

（二）检定条件

1. 标准物质[1]

（1）聚苯乙烯标准片　厚度 0.03mm，其吸收带的波数值见表 18-11。

表 18-11　聚苯乙烯标准片主要吸收带的波数值①

序号	σ/cm^{-1}	序号	σ/cm^{-1}	序号	σ/cm^{-1}
1	3027.1	4	1801.6	7	1154.3
2	2850.7	5	1601.4	8	1028.0
3	1944.0	6	1583.1	9	906.7

（2）旋转式标准扇形板　其透射比范围及透射比准确度应符合表 18-12 的要求。

表 18-12　旋转式标准扇形板透射比范围及透射比准确度

序号	标称透射比/%	实际透射比/%	实际透射比准确度/%
1	10	9～11	±0.1
2	50	49～51	±0.1

（3）测量杂散辐射用的滤光片　其技术条件见表 18-13。

（4）氮气　干燥的。

表 18-13　测量杂散辐射用的滤光片

滤光片材料	规格/mm	σ/cm^{-1}
熔石英	30×20×2	2050～1200
氟化锂	30×20×6	1140～800
氟化钙	30×20×6	760～450
氯化钠	30×20×6	410～250
溴化钾	30×20×6	240～200

2. 检定设备

气体试样池、用于充装氮气的吸耳球或注射器、滤光片架等。

3. 环境条件

仪器应置于平稳的工作台上，安放处无强振动源，无强光直射。室内应清洁，无腐蚀性气体，无强电磁场干扰。室温（15～30）℃；相对湿度≤65%；供电电源：电压为 AC（220±22）V，频率为（50±1）Hz。

（三）检定项目和检定方法

1. 外观检查

按技术要求第 1～3 条的要求进行。开机预热半小时后，设置仪器处于常用缝宽，光学零位平衡式仪器在正常增益[2]的条件下检查仪器的电平衡[3]并使之处于适当的位置。然后进行表 18-10 内各项的检定。

2. 波数正确度与波数重复性

以聚苯乙烯的吸收带作参考波数（见表 18-11），在仪器的起始波数处分别校准仪器的透射比 0%与 100%。调整走纸旋钮与波数度盘的位置，使记录笔精确地置于仪器的起始波数处。将聚苯乙烯标准片插入样品架中，以常用的扫描速度从高波数向低波数进行全波段扫描。操作波数机械返回旋钮，在同一张记录纸上重复扫描三次（具有打印装置的仪器以打印的数据为准，重复测量三次）。读取表 18-11 所对应的各吸收带的波数值。

按下式计算波数正确度（Δ_σ）：

$$\Delta_{\bar{\sigma}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sigma_i-\sigma_r \tag{18-6}$$

---

[1] 国家批准颁布相应的标准物质后，应立即采用。

[2] 把记录笔调到透射比 50%左右，分别在样品光束及参比光束中给予 20%的信号变化后，笔能迅速回到原来位置，其过冲量≤3%时，即为正常增益。

[3] 把记录笔调到透射比 50%左右，极快地关闭双光束的光门，记录笔不发生移动即为电平衡适宜。

式中，σ_i 为波数测得值；σ_r 为参考波数的数值；n 为测量次数。

按下式计算波数重复性（R_σ）：

$$R_\sigma=\sigma_{max}-\sigma_{min} \tag{18-7}$$

式中，σ_{max}为波数测得值的最大值；σ_{min}为波数测得值的最小值。

3. 透射比正确度与透射比重复性

（1）在波数 1000cm^{-1}处分别精确地校准仪器的透射比 0%与 100%；分别用 10%与 50%标准扇形板定波数测量仪器的透射比，重复测量 3 次。

不能定波数扫描的仪器，可在（1100～900）cm^{-1}波段内扫描，量取透射比的平均值作为扇形板的测得值。重复测量 3 次[1]。

按下式计算透射比正确度（Δ_τ）：

$$\Delta_\tau=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\tau_i-\tau_r \tag{18-8}$$

式中，τ_i 为透射比测得值；τ_r 为透射比实际值；n 为测量次数。

（2）在仪器的起始波数处，分别校准仪器的透射比 0%与 100%，以适当的扫描速度对聚苯乙烯标准片进行全波段扫描，重复测量 3 次（具有打印装置的仪器以打印的数据为准）。读取表 18-11 所列的各吸收带的透射比值。

按下式计算透射比重复性（R_τ）：

$$R_\tau=\tau_{max}-\tau_{min} \tag{18-9}$$

式中，τ_{max}为透射比测得值的最大值；τ_{min}为透射比测得值的最小值。

4. 杂散辐射

在仪器的起始波数处，分别精确地校准仪器的透射比 0%与 100%，根据仪器的波数范围在表 18-13 中选择合适的滤光片，分别在其所对应的波段内扫描，所得出的透射比即为该波段的杂散辐射，其最大值应符合表 18-10 中杂散辐射的要求。

5. 分辨率

（1）在气体试样池中充入适量的氨气，氨气的浓度以 951.8cm^{-1}吸收带的透射比约 50%为宜。分别校准仪器的透射比 0%与 100%。将气体试样池插入样品架中，以慢扫描速度扫描氨气在 1000～900cm^{-1}波段的谱图。要求能够分辨氨气的 951.8cm^{-1}与 948.2cm^{-1}吸收带，其分辨深度≥1%。

（2）观测 3（2）款所作的聚苯乙烯谱图（3200～2800）cm^{-1}波段：A 类仪器应能够分辨其六条吸收带，其中 3027cm^{-1}与 3000cm^{-1}吸收带的分辨深度≥1%；B 类与 C 类仪器应能够分辨其七条吸收带，其中 3103cm^{-1}与 3082cm^{-1}吸收带的分辨深度≥1%。

6. 100%线的平直度

打开样品光束与参比光束的光门，调节 100%控制旋钮，使记录笔置于透射比 95%处，以快速扫描速度扫描全波段，其 100%线的偏差应≤4%。

7. 噪声

打开样品光束与参比光束的光门，调节 100%控制旋钮，使记录笔置于透射比 95%处。在 1000cm^{-1}处定波数扫描 5min，其最大噪声（峰-峰值）应≤1%。

表 18-14、表 18-15 及表 18-16 和图 18-35 与图 18-36 给出了波长校正时常用的聚苯乙烯，

---

[1] 具有纵坐标扩展的仪器应使用标尺扩展。

茚和其他校正标准的标准波长与红外吸收光谱图（以上表和图引自文献[17]）。

表 18-14　红外光谱范围聚苯乙烯薄膜的标准波长（厚度 40μm）

谱带数	λ/μm（空气）	σ/cm^{-1}（真空）	谱带数	λ/μm（空气）	σ/cm^{-1}（真空）
1	3.3026	3027.1	8	6.3150	1583.1
2	3.4190	2924.0	9	8.4622	1181.4
3	3.5070	2850.7	10	8.6609	1154.3
4	5.1426	1944.0	11	9.3511	1069.1
5	5.3433	1871.0	12	9.7250	1028.0
6	5.5491	1801.6	13	11.026	906.7
7	6.2428	1601.4	14	14.304	698.9

表 18-15　茚的谱带位置

谱带	σ/cm^{-1}（真空）	槽厚/mm	谱带	σ/cm^{-1}（真空）	槽厚/mm	谱带	σ/cm^{-1}（真空）	槽厚/mm
1	3927.2±0.56	0.2	31		0.2	61①②	1264.0±0.12	0.025
2①	3901.6±0.64	0.2	32		0.2	62	1226.2±0.28	0.025
3②	3798.9±0.86	0.2	33	2172.8±0.30	0.2	63	1205.1±0.20	0.025
4②	3745.2±0.72	0.2	34	2135.8±0.68	0.2	64	1166.1±0.08	0.025
5②	3660.6±0.98	0.2	35	2113.2±0.28	0.2	65①		0.025
6		0.2	36	2090.2±0.40	0.2	66	1122.4±0.32	0.025
7		0.2	37②	2049.1±0.82	0.2	67①		0.025
8②	3297.8±1.06	0.2	38①②	2027.0±0.42	0.2	68	1067.7±0.30	0.025
9①	3139.5±0.44	0.2	39	1943.1±0.52	0.2	69	1018.5±0.32	0.025
10①	3110.2±0.44	0.2	40	1915.3±0.30	0.2	70①		0.025
11②	3068.9±0.66	0.025	41	1885.1±0.42	0.2	71	947.2±0.36	0.025
12①	3025.4±0.26	0.025	42	1856.9±0.52	0.2	72	942.4±0.38	0.025
13①	3015.3±0.52	0.025	43②	1826.8±0.56	0.2	73	914.7±0.16	0.025
14①		0.025/0.2	44	1797.7±0.50	0.2	74	861.3±0.14	0.025
15②	2887.6±0.82	0.025	45	1741.9±0.50	0.2	75	830.5±0.32	0.025
16①		0.2	46②	1739.2±0.78	0.2	76	765.3±0.22	0.012
17	2770.9±0.44	0.2	47	1713.4±0.66	0.2	77	730.3±0.22	0.012
18①		0.2	48②	1684.9±1.14	0.2	78	718.1±0.24	0.012
19	2673.3±0.56	0.2	49②	1661.8±0.64	0.2	79②	692.6±0.56	0.012
20①	2622.3±0.24	0.2	50	1609.8±0.42	0.025	80②	590.8±1.0	0.025
21	2598.4±0.16	0.2	51	1587.5±0.26	0.2	81	551.3±1.0	0.025
22		0.2	52②	1574.5±0.62	0.2	82	419.9±1.0	0.025
23	2525.5±0.32	0.2	53	1553.2±0.20	0.2	83	393.4±1.0	0.025
24①		0.2	54①		0.2	84	381.4±1.0	0.025
25①		0.2	55②	1457.3±0.38	0.025	85		
26②	2439.1±0.24	0.2	56②	1393.5±0.76	0.025	86		
27①		0.2	57	1361.1±0.16	0.025	87		
28	2305.1±0.42	0.2	58②	1332.8±0.42	0.025	88		
29①	2271.4±0.08	0.2	59	1312.4±0.18	0.025	89		
30①	2258.7±0.36	0.2	60	1288.0±0.08	0.025	90		

① 在简易型棱镜分光光度计中该谱带不出现。

② 由于和大气中水汽，CO_2 吸收重叠，这些谱带不适于精确校正用。

表 18-16　校正标准

全部谱线除另作说明外，均指蒸气吸收谱带

λ/μm（在空气中）	σ/cm^{-1}（在真空中）	材　料	λ/μm（在空气中）	σ/cm^{-1}（在真空中）	材　料	λ/μm（在空气中）	σ/cm^{-1}（在真空中）	材　料
1.0140	9859.4	Hg（发射）	2.913	3432.0	NH_3	5.146	1942.6	H_2O
1.1287	8857.0	Hg（发射）	3.302	3027.1	聚苯乙烯膜	5.348	1869.4	H_2O
1.3673	7311.5	Hg（发射）	3.420	2924.0	聚苯乙烯膜	5.421	1844.2	H_2O
1.5296	6535.9	Hg（发射）	3.507	2850.7	聚苯乙烯膜	5.549	1801.6	聚苯乙烯膜
1.7073	5855.6	Hg（发射）	4.254	2349.9	CO_2	5.577	1792.6	H_2O
2.3253	4299.3	Hg（发射）	4.258	2347.6	CO_2	5.640	1772.6	H_2O
2.605	3837.9	H_2O	5.142	1944.0	聚苯乙烯膜	5.708	1751.4	H_2O

续表

λ/μm (在空气中)	σ/cm⁻¹ (在真空中)	材　料	λ/μm (在空气中)	σ/cm⁻¹ (在真空中)	材　料	λ/μm (在空气中)	σ/cm⁻¹ (在真空中)	材　料
5.763	1734.6	H_2O	8.765	1140.6	NH_3	17.400	574.5	1，2，4-三氯苯液体
5.988	1669.4	H_2O	9.060	1103.4	NH_3			
6.074	1646.0	H_2O	9.217	1084.6	NH_3	18.160	550.5	1，2，4-三氯苯液体
6.184	1616.7	H_2O	9.292	1075.9	NH_3			
6.211	1609.6	茚液体	9.725	1028.0	聚苯乙烯膜	19.008	525.9	H_2O
6.243	1601.4	聚苯乙烯膜	9.814	1018.6	茚液体	19.907	502.2	H_2O
6.315	1583.1	聚苯乙烯膜	10.072	992.6	NH_3	21.161	472.4	H_2O
6.342	1576.2	H_2O	10.503	951.8	NH_3	21.780	458.8	1，2，4-三氯苯液体
6.414	1558.5	H_2O	11.007	908.2	NH_3	21.860	457.3	H_2O
6.436	1553.3	茚液体	11.026	906.7	聚苯乙烯膜	21.872	457.1	H_2O
6.824	1464.9	H_2O	11.607	861.3	茚液体	22.617	442.0	H_2O
6.958	1436.7	H_2O	12.380	807.5	NH_3	22.760	439.2	1，2，4-三氯苯液体
7.044	1419.3	H_2O	13.593	730.1	茚液体			
7.176	1393.2	茚液体	下列谱带不作为标准，但在较长波长范围内，可用作校正红外光谱分光光度计			23.860	419.0	H_2O
7.344	1361.3	茚液体				25.140	397.7	H_2O
8.244	1212.7	NH_3				26.620	375.5	H_2O
8.366	1195.0	NH_3	13.680	730.8	聚苯乙烯膜	29.830	335.1	H_2O
8.493	1177.1	NH_3	13.890	719.7	聚苯乙烯膜			
8.626	1158.9	NH_3	14.986	667.1	CO_2	30.510	327.7	H_2O
8.661	1154.3	聚苯乙烯膜	16.178	617.9	H_2O	33.010	302.8	H_2O

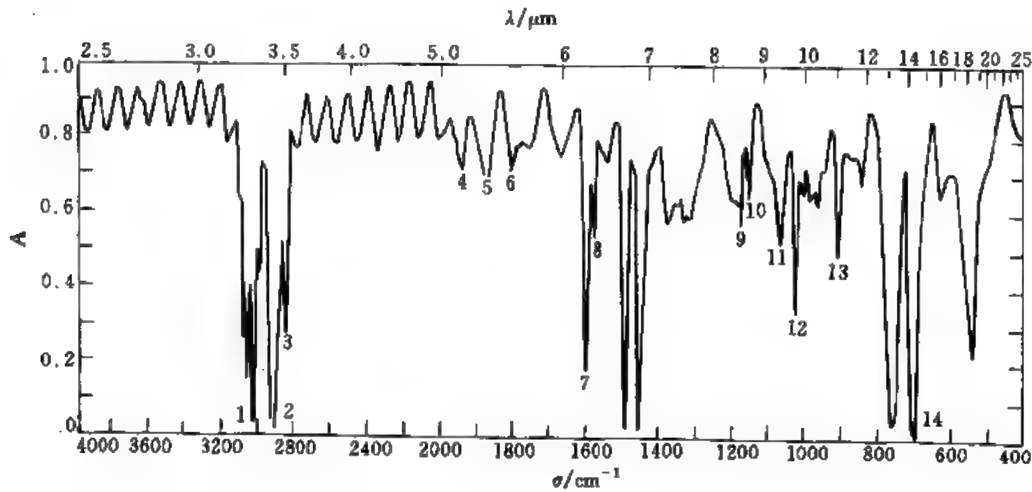


图 18-35　聚苯乙烯薄膜红外吸收光谱

四、FTIR 光谱仪分类和主要功能

FTIR 光谱仪是利用干涉装置来测定样品光谱的，这就克服了色散型仪器由于使用单色

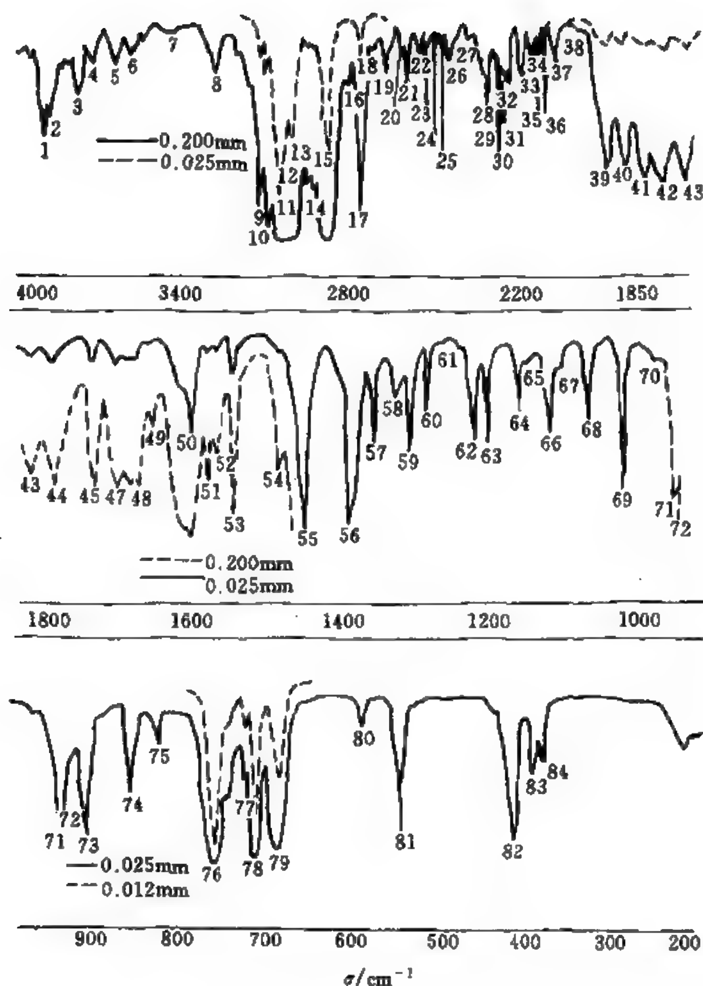


图 18-36 茚的红外吸收光谱

器所造成的弊端，和红外分光光度计比较有以下特点：

①具有扫描速度快的特点，如果光谱元总数为 M，用色散型分光光度计检测一个光谱元需时间 t，则记录整个光谱所需时间为 Mt，而在 FTIR 上检测全部 M 个光谱元仅需要时间 t，记录速度快了（$M-1$）倍，一般在 1s 内即可完成光谱范围的扫描，扫描速度最快可达 60 次/秒。

②光束全部通过，辐射通量大，检测灵敏度高。

③具有多路通过的特点，所有频率同时测量。

④具有很高的分辨能力，在整个光谱范围内分辨率达 0.1cm^{-1}是很容易做到的，仪器所能达到的光程差愈大，仪器的分辨能力也愈高。

⑤具有极高的波数准确度，利用 He-Ne 激光器提供 0.01cm^{-1}的测量精度。

⑥光学部件简单，只有一个可动镜在实验过程中运动。

⑦使用调制音频测量，杂散光不影响检测。

根据 FTIR 光谱仪的功能，可分为 4 种类型：研究型、分析型、通用型和专用型，见表 18-17[10]。

表 18-17　FTIR 光谱仪的分类

功能 \ 类型	研究型	分析型	通用型	专用型
干涉仪类型	连续动态调整型干涉仪	计算机控制自动调整型干涉仪	手动调整型干涉仪	自动/手动调整型干涉仪
最高分辨率	优于 0.5cm^{-1}	(0.5～2) cm^{-1}	(2～4) cm^{-1}	(2～4) cm^{-1}
测量范围	全光谱范围，包括近、中、远红外，(15800～50) cm^{-1}或更宽	中红外 (7400～400) cm^{-1}	中红外 (7400～400) cm^{-1}	中红外 (4000～400) cm^{-1}
信噪比① 峰-峰值：4cm^{-1}分辨率，5s 测量，(2050～2150) cm^{-1}	优于 5000：1	3000：1～5000：1	1000：1～3000：1	1000：1～3000：1
扫描速度	优于 20 次/s 多档可变	优于 10 次/s 多档可变	优于 4 次/s 2～3 档	4～10 次/s
联机功能	GC/FTIR MIC/FTIR TGA/FTIR SFC/FTIR LC/FTIR	GC/FTIR MIC/FTIR TGA/FTIR	无	无（有专用附件及专用软件）

① 信噪比　$S/N=\frac{U_TQ\xi\Delta v t^{1/2}D^*}{S_0^{1/2}}$，式中：$U_T$ 为黑体光源在指示温度时能量分布；Q 光通量；ξ 干涉仪效率；Δv 仪器分辨率；t 测量时间；D^* 检测器探测效率；S_0 检测器探头面积，由此可知 S/N 和一系列因素有关，因此在比较仪器时要选用相同条件。

近年来 FTIR 光谱发展很快，性能上有很大的提高，开发了许多新的功能。FTIR 光谱仪用计算机在高速数据采集及存贮、数据处理功能，工作智能化及仪器的操作和谱图的显示等方面都有很大进展。各种新的红外附件的开发，使各种红外光谱技术如近红外光谱，远红外光谱、红外光声光谱，红外发射光谱，红外反射光谱，动态红外光谱，显微红外光谱，FTIR 基体隔离技，联机检测技术等得到广泛的应用，现将 FTIR 光谱仪的各种功能汇总于表 18-18（第 896 页）[10]。

第四节　红外光谱的实验技术[20,21,10]

一、红外光谱的样品制备技术

对不同的样品采用不同的制样方法是红外光谱研究中取得正确信息的关键，要注意到化合物红外谱图特征谱带频率、强度和形状因制样方法不同可能带来的变化。选用合适的制样方法要从被测样品和实验目的两方面考虑，表 18-19 汇总了各种物相试样的制样方法及其适用的样品。

在空气中不稳定的液体与气体样品，只需在惰性气体手套箱中注人液体吸收池或在真空下注人气体吸收池即可。对于固体样品，一般在惰性气体手套箱中做成石蜡油糊，涂在两盐片之间，周围以室温固化硅橡胶密封或放人特制密封样品夹具。

对于光不稳定样品可在样品前加滤光片或斩波器，如红外光极易引起样品分解，可在低温下测定，或使用流动测量系统。

表18-18 FTIR光谱仪各种功能汇总表

测试功能及条件 → FTIR → 数据处理及输出

测试功能及条件

样品室附件（封闭双光束）

漫反射样品漫射聚光器（积分式）
（多重反射式）

固定角反射附件
- 10°近小角反射式
- 30°角反射式
- 80°掠角反射式

可变角反射式

镜反射附件
- 固定式镜反射附件
- 可连续调焦镜反射附件
- 可倾转镜反射附件

衰减全反射附件
- 固定角ATR
- 可变角ATR
- 浸入式ATR
- 水平式ATR（液体、固体、粉末）
- 流动池式ATR

偏振附件

变温附件（高温、高压、低温）

样品隔离测量附件

光声光谱附件（气体、液体、固体）
（透射、漫反射）

长程气体池附件

发射光谱及光纤遥控检测附件

近红外光纤远距离检测附件

时间分辨光谱附件

快速扫描技术

步进扫描技术

阶跃停止扫描技术

联机及显微

色谱联机：GC/FTIR、LC/FTIR、TLC/FTIR、SFC/FTIR、GPC/FTIR

红外显微镜：透射式、反射式、[illegible]式

热重红外联机

红外拉曼联机

质谱红外联机：GC/FTIR/MS

数据处理及输出

多种显示功能：
1. 仪器状态（能量值、各种参数）
2. 干涉图和单光谱
3. 各类谱显示（透射谱、吸收谱、ATR谱、漫反射谱、光声谱、近红外谱、远红外谱等）
4. 积分谱、微分谱、多重谱、三维图、排列谱
5. 光谱吸收值扩大及归一化
6. 谱图的扩大、缩小
7. 选取区段谱
8. 消除杂散峰、空白、屏蔽区
9. 基线的人工和自动校正
10. GC联机显示（程序、窗口谱、重建色谱、数据谱）
11. 软件程序

处理功能：
1. 基线的人工和自动校正
2. 消除多余峰、平滑一般曲线
3. 波数和波长坐标转换
4. 加谱、减谱、积分谱、微分谱
5. 谱归一化
6. 计算峰高、峰面积
7. 谱校正（ATR、漫反射、镜反射）K-K变换 K-M变换
8. 分峰处理重合峰
9. 多组分混合物自动定量

数据的输出和打印：
1. 输出谱图的标准图
2. 谱图的放大、缩小、改换坐标
3. 绘制二维图、重叠图、堆积图
4. 谱图平滑
5. 测试数据打印输出
6. 联机操作程序与相应谱
7. 高级语言数据与程序
8. 一般红外计算数据输出

存贮和检索功能：
1. 有15万张谱
2. 用户自建谱库
3. 多种软件
4. 高级语言
5. 仪器操作的显示说明
6. 红外研究文献
7. 研究报告自动插入图表
8. 谱峰检索程序

表 18-19　红外光谱制样方法一览表

试样物相	制　样　方　法	适用的样品
气相样品	气相制样通常使用10cm玻璃气体吸收池，当气体样品量较少时，可使用池体截面积不同带有锥度的小体积气体吸收池，被测气体组分浓度较小时可选用长光程气体吸收池（光程规格有10m、20m及50m）。也可用GC/FTIR直接进样分析	气体样品，低沸点液体样品和某些饱和蒸气压较大的样品
液相样品	液膜制样法：将液体夹于二块晶面之间，展开成液膜层，然后置于样品架上	不适于沸点在100℃以下或挥发性强的样品，无法展开的粘胶类及毒性大或腐蚀性、吸湿性强的液体
	吸收池制样法：用注射器将样品注入液体密封吸收池中	低沸点的液体样品或溶液样品
	涂膜制样法：(1) 加热加压法，将样品置于一晶面上，红外灯下加热，待易流动时，合上另一晶片加压展平；(2) 溶液涂膜法，将样品溶于低沸点溶剂中，然后滴于温热晶片上挥发呈膜	粘度适中或偏大的液态样品，粘度较大而又不能加热加压法展薄样品
	全反射制样法	在红外光区有极强吸收的低沸点液体和水溶液样品
	"液-液"溶液制样	液体样品为了观察氢键或酮式与烯醇式平衡等需要
固相样品	溶液制样法：固体样品溶于溶剂中，按液相样品吸收池制样法测定	易溶于常用溶剂的固体试样，在定量分析中常应用
	糊状法：固样研磨，加入石蜡油磨匀，然后按液膜制样法操作	固体样品、特别是易吸潮或遇空气产生化学变化的样品，在对羟基或氨基鉴别时
	压片法：固样加入溴化钾研磨，在压片专用模具上加压成片	该法为最常用方法，适用于绝大部分固体试样，不宜用于鉴别有无羟基存在
	熔融成膜法：样品置于晶面上，加热熔化，合上另一窗片	熔点较低的固体样品
	漫反射法：样品加分散剂研磨，加到专用漫反射装置测定	适用于固态（粉末，纤维，泡沫塑料等）样品的测定
	升华法：样品和窗片置于同一个带透红外窗口的升华装置中	适用于某些遇空气不稳定，在高温下能升华的样品
	光声光谱法	适用于用常规制样法不能测得或极难测得的试样，如深色，硬粒，非均匀固体试样
聚合物样品	液膜法 溶液挥发成膜法 加热加压液膜法 全反射法 溶液法	粘稠液体
	透过法 镜反射法 全反射法	膜片状样品
	漫反射法 压片法	适用于能磨成粉的样品
	溶解成膜法 溶液法	适用于能溶解的样品
	全反射法	适用于纤维、织物等
	显微测量技术	用于单丝或以单丝排列的纤维样品
	热裂解法	不熔不溶的高聚物，如硫化橡胶、交联聚苯乙烯等

易爆炸样品可采用糊状法，若同时加上干冰或液氮研磨糊状混合物，更为安全，也可采用微量级样品制样。对于腐蚀性样品，要选择合适的窗材或介质材料，防止在测定过程中发生变化。

二、微量样品和微区分析技术简介[21]

（一）微量样品分析技术

微量样品红外分析技术包括样品制备，微量制样和微量测量三个方面。

1. 样品制备

样品制备包括微量样品分离收集和转移技术，在红外光谱分析中最常用的微量分离方法

是，液相色谱法，气相色谱法和薄层色谱法。有关“在线”联机检测将在红外光谱联用技术一节中介绍，这里仅简要讨论微量分离检测技术。

(1) 气相色谱分离收集和转移技术　气相色谱分离后组分的收集常采用的收集方法有直接收集法[22,23]，集存收集法，KBr 粉末收集法和载体样吸附收集法，因收集技术困难，以上所述的收集方法使用不便。

(2) 薄层色谱分离转移技术　薄层色谱分离后的组分的收集可采用直接洗脱法[24]，其中的点状转移法如图 18-37 所示，若采用仪器洗脱法，其仪器洗脱设备示意图见图 18-38[21]。另一种洗脱转移技术可采用 TLC 吸样管，其结构示意图如图 18-39[21]。吸样管是由带有弯曲斜口的吸样头，带有砂板的收集洗脱两用管以及抽气尾管组成，使用时把抽气尾管接上抽气泵，让吸样管接触已标出的吸收带区，带有样品的吸附剂即进入收集管，取下吸样头和吸管尾管，竖起收集管即可用溶剂洗脱样品。

对洗脱溶剂有如下要求：对洗脱样品有良好的溶解性，要有足够强的极性，易于挥发、对光谱测量无干扰，不洗脱吸附剂组分。要特别注意 TLC 中微粒硅胶混入样品中对 IR 谱图中 $1100cm^{-1}$ 峰的影响。

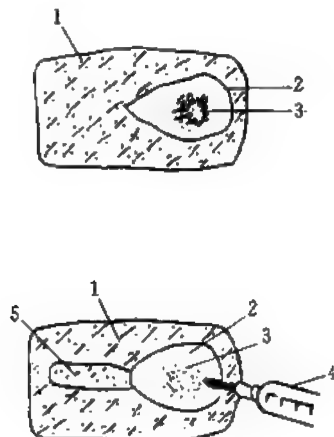


图 18-37　点状转移法示意图
1—去掉硅胶层的 TLC 板；2—硅胶层；
3—TLC 斑点；4—注溶剂的针筒；5—KBr 粉

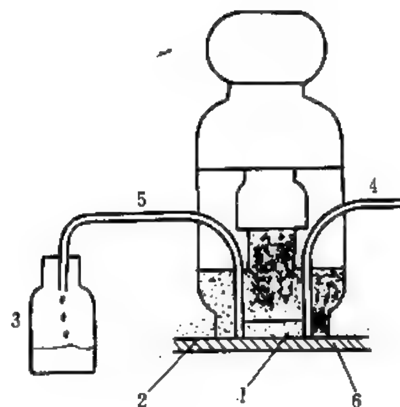


图 18-38　仪器洗脱设备示意图
1—样品斑点；2—吸附剂；3—接液瓶；
4—溶剂入口；5—溶剂出口；6—玻璃板

2. 微量制样技术

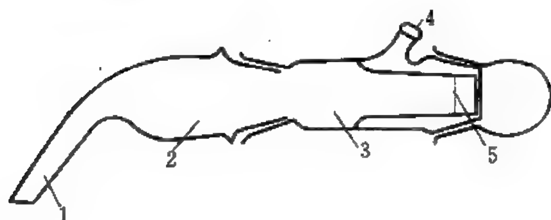
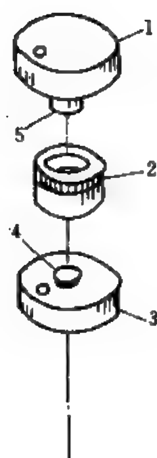


图 18-39　TLC 吸样管结构示意图
1—吸样口；2—吸样管；3—接样管；4—吸气口；5—砂板

(1) 微量固体制样的方法　常用的有微型压模法[25]，其微量压片模具见图 18-40[20]（最小压片直径为 0.5mm），无模具微量压片法[26~28]，二次压片法（夹心法）[29,30]，糊状法，金刚石高压法。

(2) 微量液体测量　对于粘度大的高沸点液体样品可用聚光器配合微反射法测量或采用微量浸反射法测量[31,32]，对易挥发的液体样品可用微量液体池和毛细管池[33]。常见的微量液池有两种：一种是与常量密封液池结构相同的微型池，另一种是可自行加工的微量液池，见图 18-41[20]。



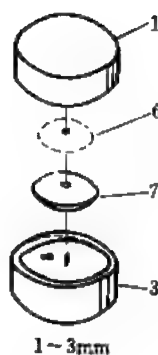


图 18-40 微量压片模具

1—上膜；2—样品圈；3—下膜；4—下芯；5—7mm上芯；6—样品板；7—硅橡胶弹性片

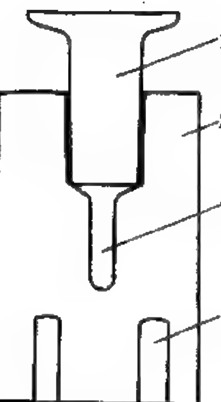


图 18-41 微量液池

1—塞子；2—池体；3—样品孔；4—定位孔

(3) 微量气体样品测量　可采用池内多次反射方法并结合纵坐标扩展技术。另外基体隔离技术为气体低温微量测量提供了新的方法。

3. 微量测量技术

在微量测量中经常使用红外聚光附件以增加光通量，提高检测灵敏度。常用的红外聚光附件有两种类型：透射式和反射式。透射式聚光附件是用透红外的晶体材料加工成聚光透镜来使样品光束收敛，其示意图见图 18-42[20]。反射式红外聚光装置是用凹面反射镜和平面镜组合而成的光学系统，其示意图见图 18-43[20]。

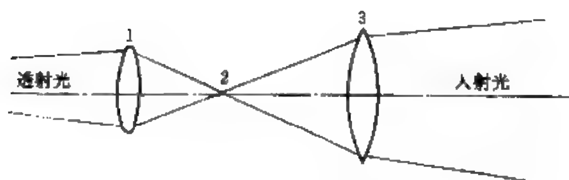


图 18-42 透射式红外聚光器

1，3—透红外光材料制成的透镜；2—样品

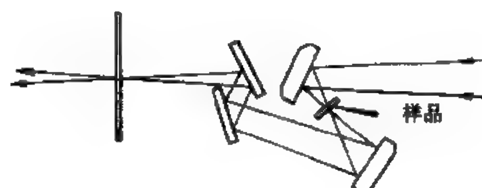


图 18-43 反射式聚光器光路图

在微量样品的测定中要注意仪器条件的设定，对色散型仪器应选用宽狭缝，慢扫描和足够的时间常数。对 FTIR 仪器，应注意光能利用和累加技术，采用计算机处理技术，如应用差谱技术，微分光谱技术，因子分析和拟合法等数据处理技术及纵坐标扩展技术。

（二）微区样品分析技术

傅里叶变换红外光谱显微技术为微区样品分析提供了有力的工具。FTIR 微区测量方法有微孔法[34]和 FTIR 红外显微镜。近年来微区测量工作都转向应用红外显微镜[10]。

1. 红外显微镜

傅里叶变换红外显微镜按其光路系统的差异分为同轴光路显微镜和非同轴光路显微镜两

大类。非同轴光路系统红外显微镜有透射式和反射式两种，其结构和光路，如图 18-44[10]和图 18-45[10]所示。

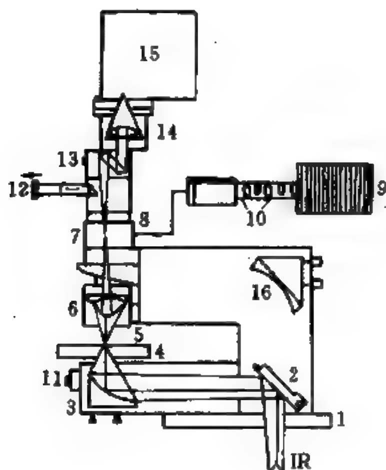


图 18-44 透射式红外显微镜光路图

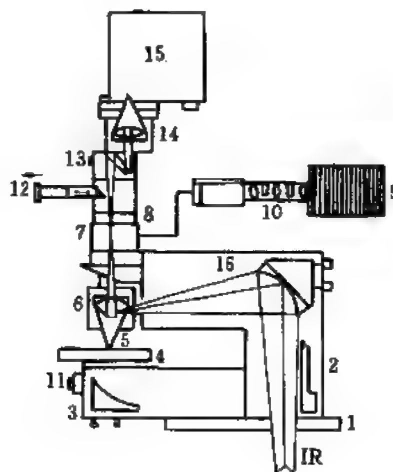


图 18-45 反射式红外显微镜光路图

1—固定台；2—反射镜；3—椭圆镜；4—载物台；5—样品；6—物镜；7—转移器；8—可变光阑；9—照明光源；10—光调焦旋钮；11—调节旋钮；12—目镜；13—转换镜；14—检测器物镜；15—MCT 检测器；16—反射镜

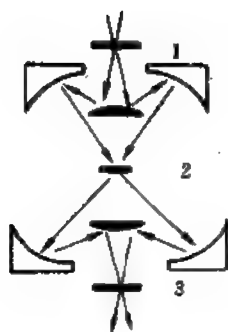


图 18-46 透射式红外显微镜光路图
1—上光阑；2—样品；3—下光阑

同轴光路红外显微镜也反为透射式和反射式，其光路图如图 18-46[10]和图 18-47[10]所示。

2. 红外显微镜的应用

红外显微镜适于进行样品的微区分析，目前在研究单位和工业部门获得越来越广泛的应用，可参阅文献[35~38]。可测样品的最小几何尺寸约为 10μm。

三、高压红外光谱技术简介[10]

为了研究在高压下化合物及材料的结构变化，相转变，分子构象的转变，研究在高压反应条件下的反应动力学，对红外光谱自身的研究如确定谱带来源、确定费米共振谱带、确定分子内和分子外的相互作用力产生的谱带及区分简谐振动和非简谐振动等的需要，在近 20 多年来高压红外光谱法得到了广泛应用。

（一）红外高压池

1. 耐高压的红外透过材料

各种高压红外窗片材料及性质见表 18-20。

2. 高压红外吸收池的种类

目前使用较普遍的高压红外吸收池有：内压活塞型流体传压池，外压型流体传压池，活塞圆筒型高压池和砧型高压池。见图 8-48～图 8~51。

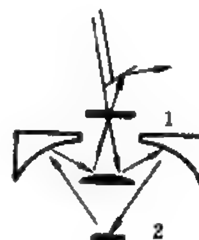


图 18-47 反射式红外显微镜光路图
1—光阑；2—样品

砧型高压池中有金刚石砧高压池，玻璃砧型高压池和氟化钙砧型高压池。金刚石砧高压池一般可用至 10GPa 压强，顶砧面积越小，压强愈大，但砧面大，可放置样品面积大，经改进的金刚石砧高压池的压强可

达 55GPa，超高压的金刚石砧高压池可达 170GPa。

表 18-20 高压红外光学材料[10]

材料	光谱范围 λ/μm	折射率①	极限强度①	杨氏模量/(ib·in⁻²)③	努普硬度值	溶解度 g/100g 水中
NaCl	0.2～15	1.52(4μm) 1.4(10μm)	—	5.8×10^6	15.2～18.2	35.7(0℃)
LiF	0.11～6	1.35(4μm) 1.1(10μm)	—	$(9.40\sim11)\times10^6$	102～113	0.27(18℃)
Irtran I (MgF_2)	1～8	1.35(4μm)	21800	$16.6\sim10^6$	576	0.0076(18℃)
CaF_2	0.13～9	1.41(4μm)	—	$(11\sim15)\times10^6$	158	0.0016(18℃)
Irtran 3 (CaF_2)	1～10	1.41(4μm) 1.34(8.3μm)	5300	14.3×10^6	200	不溶
Irtran 2 (ZnS)	2～14	2.25(4μm) 2.20(10μm)	14100	14×10^6	354	0.00069(18℃)
Irtran 4 (ZnSe)	0.5～20	2.5(4μm) 2.4(10μm)	6100	10.3×10^6	150	不溶
MgO	≤6.8	1.7(2.2μm) 1.66(4.3μm)	—	36.1×10^6	690～692	0.000012
Irtran 5 MgO	1～8	1.67(4μm) 1.60(6μm)	19200	48.2×10^6	640	0.00062
蓝宝石 (Al_2O_3)	≤5.5	1.73(2.2μm) 1.68(4.3μm)	—	50.56×10^6	1370 1525～2000	9.8×10^{-6}
钛酸钡陶瓷 ($BaTiO_3$)	≤6.9	2.4(2.2/4.3 μm)	—	16.50×10^6	—	—
方解石 ($CaCO_3$)	0.2～5.5	≈1.7(1μm)	—	10.50×10^6 12.80×10^6	—	0.0014(25℃)
Ge	1.8～2.3	≈4.0 (2～10μm)	—	14.9×10^6	—	不溶
Si	1～9	3.43(3μm) 3.42(5～10μm)	—	19.0×10^6	1150	不溶
熔融石英 (SiO_2)	0.3～3.5	1.43(2.2μm)	—	$(9.6\sim10.6)\times10^6$		不溶
(corning7905，GE 型 101—100，Infrasil)				14.1×10^6		
NBS F158SiO_2	4.5	1.80(2.2μm)	—	15.4×10^6	461	不溶
Bausch & Lomb②						
RIR-2	4.5	1.75(2.2μm)	—	10.2×10^6	800	—
RIR-10,11,12	5.0	1.62(2.2μm)	—	15.2×10^6	900	不溶
RIR-20	5.5	1.82(2.2μm)	—	$(12\sim14)\times10^6$	760	—

① 25℃。

② 铝酸钙($CaO-Al_2O_3$)及类似材料。

③ $1ib\cdot in^{-2}=0.6895Pa$。

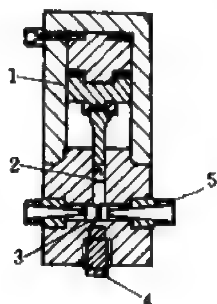


图 18-48 内压活塞型流体传压池[39]

1—低压活塞；2—高压活塞；3—蓝宝石；4—测量活塞；5—窗片活塞

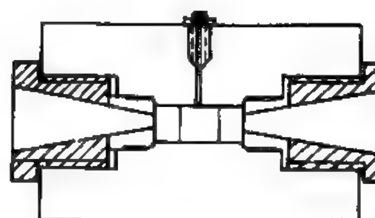


图 18-49 外压型传压型红外高压池示意图

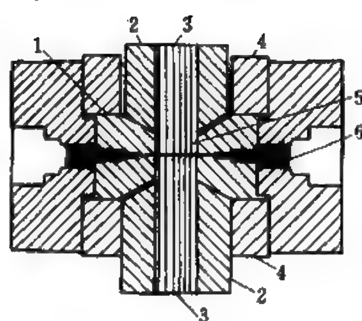


图 18-50 活塞圆筒型高压池的结构图[40]
1—垫圈；2—钢套管；3—可动碳化钨合金活塞；
4—活塞导管；5—高压池；6—熔融 NaCl 窗片

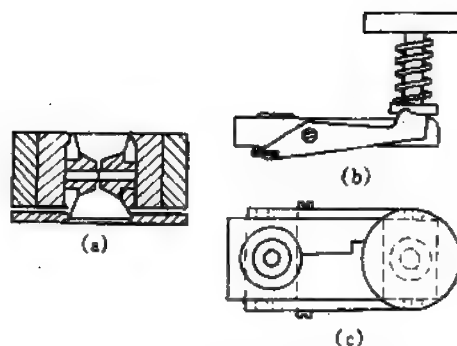


图 18-51 金刚石砧型高压池[41]
(a)金刚石池详细结构图；(b)侧视图；(c)俯视图

砧型高压池窗片的最小厚度由下列公式估算：

$$d=[1.1pr^2/S_a]^{1/2} \quad (18\text{-}10)$$

式中，d 为最小窗片厚度 (mm)；p 为装置所给的压强 (Pa)；r 为窗片未受支撑面积的半径 (mm)；S_a 为材料能承受的最大压强 (Pa)。

最常用的窗片类型有 3 种，见图 18-52[10]。

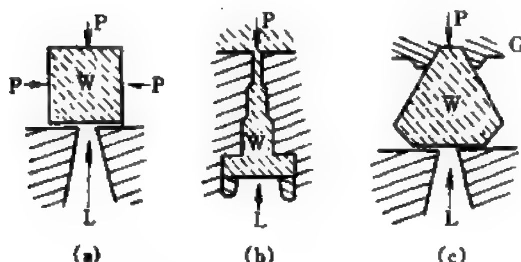


图 18-52 3 种常用的窗片类型
(a) Poulter 型窗片；(b) Drickamer 型窗片；
(c) 对顶砧型窗片
P—压力方向；W—窗片材料；L—红外光；G—密封垫圈

(二) 压强单位和压强的标定

1. 压强单位

国际压强单位为 Pa 或 N/m^{-2}，它们之间和其他压强单位的相互关系如下：

1bar＝0.9869atm＝10^5N/m^{-2}＝10^5Pa

1kbar＝10^3bar＝10^8N/m^{-2}＝10^8Pa＝100MPa

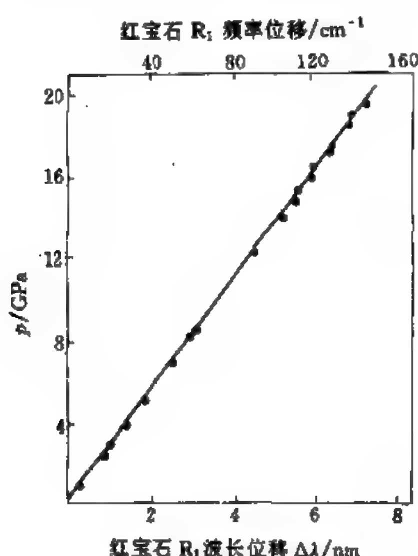


图 18-53 红宝石的压强标定曲线

表 18-21 高压下红宝石的光谱位移值

Δλ/nm	p/GPa
3.0	8.3
7.5	20.6
10.6	29.1
18.0	49.5
22.5	61.9
29.0	79.7
31.0	82.3
32.0	88.0
37.0	101.8

1Mbar=10^3kbar=10^{11}N/m^{-2}=10^{11}Pa=100GPa

2. 压强的标定

在外压式的高压池中的压强可从外部压力发生器中的压力知道，不需要复杂的校正与测定，在极小的砧型高压池中的需要一定的方法进行标定。标定方法有：红宝石标定法，结晶石英标定法[42]，以二甲基乙二肟镍为标定物[43]，以甲醇作内标物[44]。另外，还有其他标定方法[45~47]。

红宝石的压强标定曲线和高压下红宝石的光谱位移值见图 18-53[10]和表 18-21[10]。

石英 801cm^{-1}谱带的位移与压强的关系曲线见图 18-54[10]。

二甲基乙二肟镍（18900cm^{-1}）吸收峰位移与压强的关系为

$$\Delta\nu=-158.9p+1.82p^2\ (p\ 单位为\ kbar)$$

甲醇的 3630cm^{-1}羟基频率位移与压力的关系见表 18-22[10]。

表 18-22　OH 频率位移与压力的关系（25℃）

σ/cm^{-1}	p/atm
3630	1
3621	2420
3615	5840
3609	8000
3604	10900

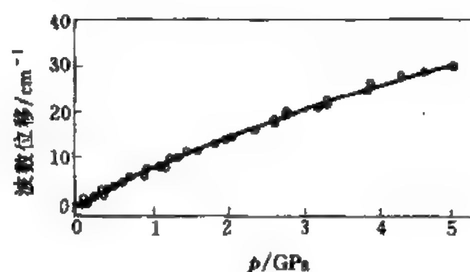


图 18-54　石英 801cm^{-1} 谱带的位移与压强的关系曲线

一些常用于砧型高压池的压力传递介质见表 18-23[10]。

表 18-23　用于砧型高压池的压力传递介质①

介　　质	p_{min}/GPa	p_{max}/GPa	介　　质	p_{min}/GPa	p_{max}/GPa
CH_3OH+EtOH	10.4	−20.0	Ne	4.7	16.0
(4+1)			Ar	1.2	9.0
H_2O+CH_3OH+EtOH	14.5	−20.0	Xe	—	30.0
(16+3+1)			H_2	5.7	>60.0
He	11.8	>60.0	N_2	2.4	>13.0

① p_{min}—室温下液固转变的最低压力；p_{max}—保持流体静力学状态的最高压力。

（三）高压红外光谱法的应用

高压红外光谱研究的方面有：压力对光谱影响[48]，高压下相转变研究[48,49]，高压诱导产生的特殊晶型高聚物[50,51]，高分子与气体间相互作用[52]，生化作用[53]，反应动力学[54~56]，压力对分子构象的影响[57,58]，谱带的归属[59,60]，金刚石砧型高压池在刑事侦破[61]及在地球化学和物理[62,63]方面应用。

四、红外反射光谱技术简介[21]

红外反射光谱一般可分为内反射光谱和外反射光谱，后者可包括镜面外射法，反射吸收光谱和漫反射，内反射光谱和外反射光谱统称为反射光谱。

（一）衰减全反射法

衰减全反射法 (attenuated total reflection spectra, ATR) 也称多次内反射法 (multi internal reflection, MIP)。当一束光线从光密介质进入光疏介质时，当入射角大于临界角，则产生全

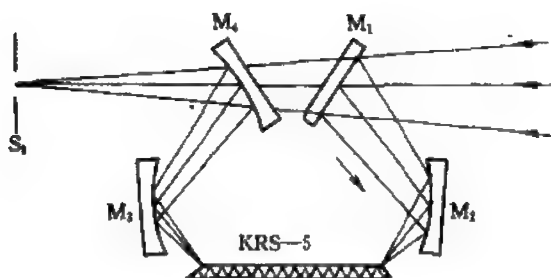


图 18-55 多重衰减全反射装置

M_1—平面镜；M_2，M_3，M_4—球面镜；S_1—入口狭缝

反射现象，根据这一原理制作 ATR 装置，多重衰减全反射装置如图 18-55 所示。

它由 KRS-5 晶体和四块反射镜组成，使用时直接把试样放置於晶体两面，测定时红外光在试样薄膜之间多次全反射被选择吸收，就可以获得试样的红外光谱图。

使用多重反射增加了试样吸收谱带的强度，除各谱带的强度和试样本身的吸收性质有关外，还和光线的贯穿深度 d_p 有关，可用下列公式表示

$$d_p=\frac{\lambda_1}{2\pi[\sin^2Q-(n_2/n_1)^2]^{1/2}} \tag{18-11}$$

贯穿深度决定于光线的波长 λ_1，反射晶体的折射率 n_1 和样品折射率 n_2 及入射角 Q。在入射角 Q 及反射晶体折射率 n_1 选定后，试样折射率 n_2 是固定的，d_p 和 λ_1 成正比，所以反射吸收谱与一般透射吸收谱图相比其基本特征相同，但前者低波数的吸收峰相对增强了，高波数的吸收峰相对变弱了。

使用该技术可以不经分离直接测绘表面涂层，橡胶及催化剂表面化学组成，在实验中我们还可以改变入射角 Q，得到贯穿深度不同的红外光谱，再利用差谱技术得表面二种，甚至二种以上不同涂层的红外光谱，衰减全反射是一种很实用的红外光谱技术。

在 ATR 中常用的一些晶体材料的性质如表 18-24 所示。

表 18-24 用于 ATR 的一些晶体材料的性质和临界入射角 Q_c

材料	透光范围下限/cm^{-1}	n_1	$n_2=1.5$ 时的 Q_c	备 注
AgCl	500	2.0	48.6	便宜，软，对 UV 敏感，对金属腐蚀
AgBr	300	2.2	43.0	便宜，软，但比 AgCl 硬
Si	1600	3.45	25.7	较便宜，硬，比 Ge 不易碎，可使用至 300℃
Ge	870	4.10	21.5	较便宜，硬，但易碎，120℃以上不透明
KRS-5 (TlBr-TlI)	330	2.38	39.0	便宜，易变形，有毒
Irtran-2 (ZnS)	700	2.26	41.6	较便宜，比 Ge 不易碎，比 KRS-5 不易变形，透光范围不像 Ge 受温度影响，Irtan-4 的不纯谱带在 $1100cm^{-1}$，Irtan-6 的透光范围宽，但较软
Irtran-4 (ZnSe)	500	2.4	38.7	
Irtran-6 (CdTe)	350	2.67	34.2	

（二）镜面反射法[21]

镜面反射光与入射光的光强比 R（即反射率）为

$$R=\frac{(n-1)^2+a^2}{(n+1)^2+a^2} \tag{18-12}$$

式中 n 为折射率；a 为吸光系数，n 与 a 在分子共振吸收频率附近都有突变，因此，R 在分子共振吸收频率附近也会产生突变。一般来说，透射吸收越强的频率附近，镜面反射率也越大，因此可以得到红外反射光谱。但透射吸收峰与镜面反射峰不一定完全重合，反射峰往往向高波数移动。

反射率和入射角及样品的折射率和吸光系数之间的关系是较复杂的，入射辐射的偏振性亦起重要作用，在日常的工作中镜面反射法使用不普遍，但对光学常数的测定等方面较为重要。

对各向同性物质的镜面反射光谱测量，只需将经抛光的样品放于样品架上，测其镜面反射光强 I_r，取下样品，换上镀铝（或金）镜，将测得的反射光强作为入射光强 I_0，I_r 与 I_0 之比即为反射率 R，也就是一般所称的镜面反射光谱。对各向异性物质的镜面反射光谱的测量可采用红外偏振片测量和应用差谱法测量。

在要求精确测定物质的反射率时需要对反射率作校正。因任何反射镜的反射率都小于100%，需要乘上小于 1 的系数 B 才能获得被测物真正的反射率，系数 B 可通过对已知折射率 n 的红外透明材料反射率的测量获得，设此材料在小角度入射时测得的反射率为 R'，利用 18-12 式（对透明材料 $a=0$）计算的反射率为 R，则，$B=\frac{R}{R'}$。

两种镜面反射光谱的测量装置如图 18-56，18-57 所示。

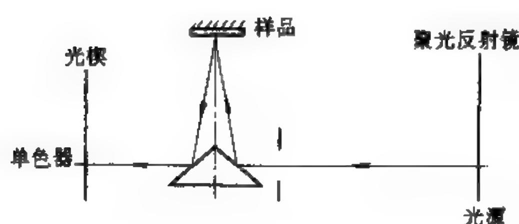


图 18-56　固定角反射附件

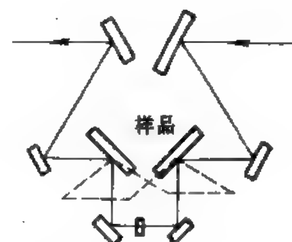


图 18-57　可变角镜面反射附件

（三）反射-吸收光谱法（RA）[10,64,65]

RA 光谱是镜面反射光谱的一种特殊情况。RA 光谱是镜面反射光谱与透过样品二次的透射光谱之和。Greenler 对 RA 光谱的理论作了较详细的讨论，经计算指出在入射角接近 90°（≈88°）时，吸收强度达到最大，所以 RA 光谱测量时 IR 光束多以掠角方式入射到样品上获得 IR 谱。

在 RA 光谱中，S 偏振光（入射光电矢量与入射面垂直的偏振光）对 RA 谱的吸收贡献很小，因此只考虑 P 偏振光（入射光电矢量与入射面平行的偏振光）产生的吸收。根据电场与分子振动跃迁距相互作用规律，只有电场矢量与偶极跃迁矩平行时才能产生红外吸收，因此，在掠角反射吸收测量中，只有振动跃迁矩在表面垂线方向上有分量的振动模式才能被激发产生吸收光谱，这就是“金属-表面”选择定则，故 RA 谱特别适用于研究跃迁矩垂直于表面的基团的振动情况。

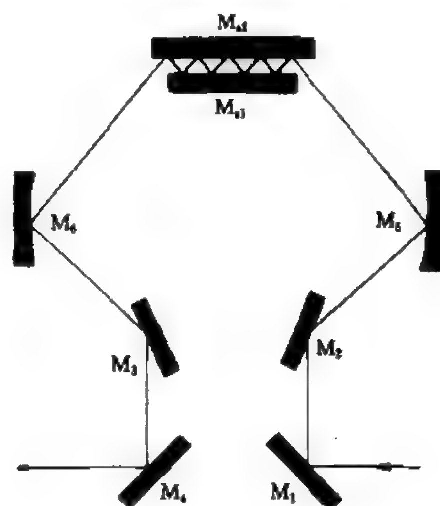


图 18-58　多次反射的反射吸收附件光路图

测量反射-吸收光谱的附件亦分为一次反射和多次反射两种，一次反射附件和镜面反射附

件完全相同，区别是在测试样品时先把样品附着在反射镜上，再把附着样品的反射镜放在样品架上。图 18-58 是多次反射吸收装置的光路图，图中 M_{s1}和 M_{s2}是附着样品的反射镜，互相平行，相距（2～3）mm，M_1、M_2、M_3、M_4 是平面反射镜，M_5 与 M_6 是聚光用凹面反射镜。

将偏振调制技术与 RA 技术相结合发展起来的偏振调制反射吸收光谱[66]（polarization modulation Reflection Absorption Spectroscopy，简称 PMRAS）在保持 RA 方法测试特点的基础上，提高了 RA 技术的表面灵敏度和抗环境干扰能力。

（四）漫反射技术[10,21]

利用漫反射附件来鉴定某些难以用常规方法分析的试样，图 18-59 是一种漫反射附件装置的光路图。当粉末试样受红外辐射光照，将产生大量向各个方向的散射光，用特殊设计的凹面镜，将其全部收集起来，使之进入红外光谱仪，得到试样的漫反射光谱图。

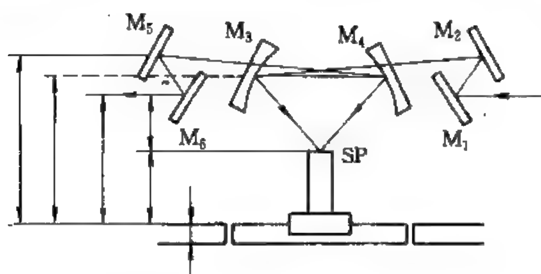


图 18-59 漫反射附件装置光路图
M_1，M_2，M_5，M_6—平面镜；SP—样品池；
M_3，M_4—凹面镜

对漫反射光谱的解释，现在都采用 Kubelka-Munk 方程式：

$$f(R_\infty)=\frac{(1-R_\infty^2)}{2R_\infty}=\frac{K}{S} \quad (18\text{-}13)$$

式中，R_∞是试样在无限深度下，试样的漫反射与所选定标准物（如 KBr 或 KCl）漫反射之比，即 $R_\infty=R_{试样}/R_{标样}$；K 是试样分子吸收系数；S 是试样散射系数。

原始漫反射光谱图横坐标是波数，纵坐标是 R_∞，经(18-13)式换算后，纵坐标是 Kubelka-Munk 单位，最终得到的漫反射光谱图与红外吸收谱图相似。

漫反射装置多用于 FTIR，也可用于计算机控制的色散型红外光谱仪。

五、偏振红外光谱技术简介[10,21]

（一）红外二向色性的原理

偏振红外光谱法是用偏振红外光对样品进行红外光谱测定的方法。所谓偏振光即光的振动电矢量偏在某一平面内的光。如果光束中光波的振动电矢量完全集中在一个平面内，这种偏振光称为完全偏振光（又称为线偏振光）。进行偏振红外光谱研究时使用两束振动电矢量互相垂直的完全偏振光作光源。偏振光的偏振率或偏振度的定义为：

$$Q=\frac{I_{/\!/}-I_{\perp}}{I_{/\!/}+I_{\perp}}\times 100\% \quad (18\text{-}14)$$

式中，$I_{/\!/}$和 $I_{\perp}$是自然光通过偏振器后产生的偏振光的平行光强度与垂直光强度。

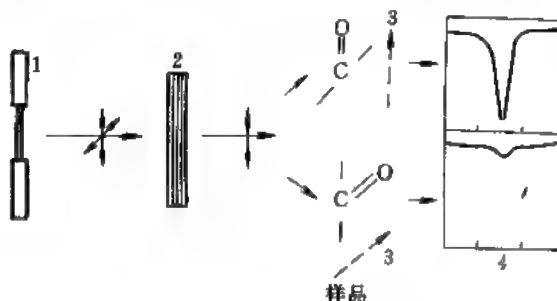


图 18-60 红外二向色性基本原理示意图
1—红外光源；2—偏振器；3—振动跃迁矩方向；4—光谱图

偏振红外光谱中谱带强度随偏振光方向而发生变化的现象称为红外二向色性。当入射光

的电矢量方向与跃迁矩的矢量方向平行时，则对应该振动模式的跃迁有最大吸收强度；反之，当其电矢量方向与跃迁矩的矢量方向垂直时，就不发生吸收，其基本原理如图 18-60 所示。

偏振光谱中谱带的吸光度 A 为

$$A=\lg\frac{I_0}{I}\ (M\cdot E)^2 \tag{8-16}$$

式中，I_0 和 I 是入射光和透射光强度；M 是分子的简谐振动的跃迁矩矢量；E 是入射光的电矢量。对于某一给定振动模式，其跃迁矩方向是一定的，如果 M 和 E 之间的夹角为 β，则 A 正比于 $\cos^2\beta$。

当偏振光与晶体的晶轴平行或与高分子样品拉伸方向平行时称为平行光；反之，称为垂直光。先后使用平行偏振光和垂直偏振光分别测出某谱带在两个偏振方向的吸光度 $A_{/\!/}$ 和 $A_{\perp}$，这两者的比值 R 称为该谱带的二向色性比，可表示为：

$$R=\frac{A_{/\!/}}{A_{\perp}} \tag{18-15}$$

R 值可从零到无穷大，一般把 R 大于 1 的谱带称为平行谱带，R 小于 1 的谱带称为垂直谱带。

（二）偏振红外光谱的测定

1. 偏振器

偏振器有两种：电介质偏振器和线栅偏振器。电介质偏振器根据偏振光来自透过光束和反射光束的区别，又分为透射式偏振器与反射式偏振器。

透射式偏振器由一组 6 片微呈楔形的氯化银片组成，以扇形方式排列，各片与入射光呈 Brewster 角（$\tan\alpha=n$）。这种偏振器的偏振度为 99%，透过光强为 52%。Elliott 等介绍的用 6 片硒片组成的透射式偏振器偏振度为 98%，透过率为 37%。

反射式偏振器是由一组真空喷涂高折射率的硒膜和硅膜的玻璃片组成。入射光以偏振角射到膜表面，其反射光即为高偏振度（99.5%）的垂直偏振光，这类偏振器透过率为 37%。

线栅偏振器是由许多相互平行的金属线组成的栅状薄膜，其原理是当两金属线的间距（光栅常数）小于入射光波长的 1/4 时，入射光中只有电矢量方向垂直于光栅狭缝的光可以全部通过，而电矢量平行于光栅狭缝的光被全部反射，这种偏振器的偏振度在 99%以上，透过偏振光的能量较大，已被广泛应用。

2. 偏振红外光谱测量方法

（1）样品制备　对晶体样品，可顺晶体的解理面剖开，取得合适厚度的单晶片测定；对于小晶粒，可培养使其长大，再以不同方法进行表面抛光，以得到合适厚度，表面光滑的晶粒。对高聚物样品，以一定的温度、一定的拉伸比及拉伸速度等参数来拉伸纤维及薄膜样品制得其取向样品，热塑性树脂可用挤出、热压等方法制得取向样品。取向生物膜采取红外 ATR 技术测定，可将生物样品用氯仿或水制成 10^{-3}mol・L^{-1}的溶液，滴于 ATR 的晶片上，在黑暗的空气环境中 5℃下缓慢干燥，即可得到取向生物膜。

（2）测试方法　偏振红外光谱的测试方法包括偏振透过红外光谱的测定[67,68]；偏振 ATR 光谱测定[69]；偏振调制 FTIR 技术测定二向色性差[70]；偏振傅里叶变换红外光声光谱法测定红外二向色性[71]和向列型液晶取向法测定小分子的偏振红外光谱[72]。

(3) 偏振红外光谱的应用[10] 偏振红外光谱的应用主要在以下几方面：研究化合物的结构与构象，偏振红外光谱谱带频率位置及强度和该基团或结构的周围环境及本身振动跃迁矩方向有关，因此从其变化可推断化合物结构与构象；确定谱带的归属；单分子膜分子取向与排列的研究，采用两种偏振红外光谱技术，一是采用偏振红外透过光谱，二是采用掠角反射光谱，这两个方法所得偏振红外光谱分别来自单分子膜的差异，这就可以归属光谱中谱带及推断单分子膜中分子的取向结构及分子排列方式；高聚物的取向、取向松弛及断裂过程的研究；分离重叠的红外谱带和在生物化学及生物物理研究中的应用。

六、红外光谱基体隔离技术简介[21]

（一）基体隔离技术的基本原理

基体隔离技术（matrix lsolation，MI）在实验上就是把试样 S 分子和惰性基体气体 M 在冷冻温度下共沉积在一适宜的基底上，这时 S 分子被无相互作用的 M 固态基体隔离，测得的光谱等同于此温度下的气相光谱。这种为试样模拟一个气相条件的实验技术称为基体隔离技术。基体隔离原理示意图如图 18-61[21]所示。

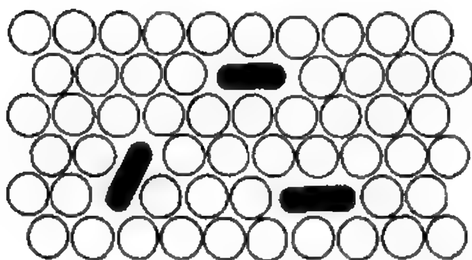


图 18-61 基体隔离原理示意图
不活泼、刚性的基体晶格（阔圈）把活泼的试样分子相互隔离，阻止起反应

基体隔离技术目前已发展成为一门有力的光谱技术，在活泼分子和自由基的光谱研究中，高温试样的研究，MI 与 FTIR 的结合和在微量样品的定性定量分析中都显示出其优越性。

（二）基体隔离技术的实验装置

红外光谱基体隔离技术的实验装置，除光谱仪外主要包括低温恒温器，真空罩试样沉积装置和其他辅助装置（包括试样和基体的贮藏及混合的真空系统，真空测量装置，温度测量和控制系统等）。

基体隔离装置示意图如图 18-62[21]所示。

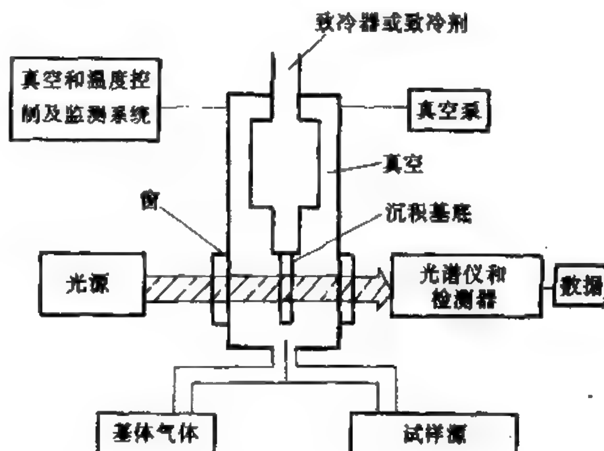


图 18-62 MI 装置示意图

1. 低温恒温器

用于 MI 技术的低温恒温器有双级杜瓦瓶[73]，开路-循环低温恒温器和闭路-循环低温恒温器。早期的 MI 研究均使用双级杜瓦瓶，因其消耗费用昂贵，操作不便等原因目前很少使用。开路-循环低温恒温器有商品生产，其主要性能列于表 18-25[21]中。

60 年代中期出现的闭路-循环低温恒温器，因其在（10～300）K 温度范围易于控制，体积小、无危险，不消耗致冷剂，运转费用低等优点被广泛应用，因而也推动了 MI 技术的普及应用。表 18-26 给出了部分商品闭路-循环低温恒温器[21]。

表 18-25 商品开路-循环低温恒温器

低温恒温器	体　系	温度范围/K	致冷容量	低温恒温器	体　系	温度范围/K	致冷容量
AC-1	气 N_2	68～300	7W 在 77K				500mW 在 4.4K
AC-2	气 N_2/气 H_2	16～200	4W 在 23K	SES～227	气 N_2/气 H_2	20～77	1.5W 在 21K
AC-2L	液 N_2/气 H_2	16～77	6W 在 22K	SES～237	液 N_2/气 H_2	20～77	4W 在 20K
AC-3L	液 N_2/气 H_2、He	36～77	4W 在 20K				

表 18-26 商品闭路-循环低温恒温器

低温恒温器	温度范围/K	致冷容量	低温恒温器	温度范围/K	致冷容量
Philips Cryogem	30～300	15W 在 77K	20 型	18～300	0W 在 15K
单级型		1.5W 在 30K	Air Products Displex		
双级型	20～300	3W 在 30K	CS-102 型	30～300	5W 在 38K
		1W 在 20K	（单级）		0W 在 30K
Cryogenic Technology			CS-202 型	12～300	2W 在 25K
Cryodyne			（双级）		1.5W 在 20K
70 型	35～300	5W 在 50K			0W 在 12K
		1W 在 34K	British Oxygen Company		1.5W 在 16K
20 型	18～300	1.5W 在 22K	CRS 1R-16mK2	10～300	2.2W 在 20K
		1W 在 19K			

2. 真空罩试样沉积装置

真空罩示意图见图 18-63[21]。

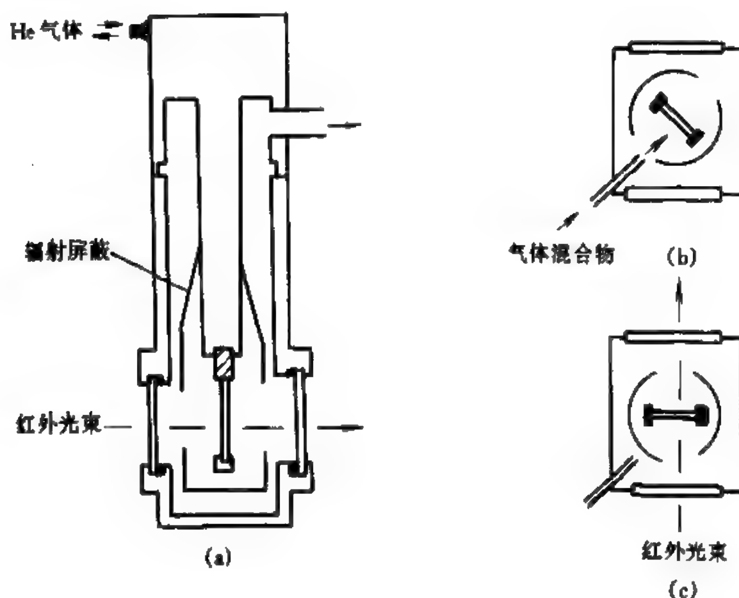


图 18-63 真空罩示意图

(a) 低温恒温器和真空罩；(b) 沉积时沉积基底位置；(c) 记录光谱时沉积基底位置

真空罩窗片可用 NaCl（600～50000cm^{-1}），CsI（170～40000cm^{-1}），远红外可用高密度聚乙烯，用于透射红外的样品沉积基底有 NaCl 和 CsI 窗片，远红外用单晶硅薄片，用于反射红外的样品沉积基底有 Au、Cu 或 Ni 镜。

（三）基体物质

在 MI 技术中，许多物质均可用作基体，在选用时要考虑如下因素：纯度，光谱和光散射性质，惰性和热学性质（包括扩散温度、熔化潜热、挥发性、晶格能和热导率等）。目前使用的基体物质可分为四类：第一类是稀有气体和氮；第二类是简单的碳氢化合物，如甲烷、乙

烷、乙烯和乙炔等；第三类是 O_2、CO、CO_2、H_2S、SO_2、NO、NO_2、Cl_2 和六氟化硫等；第四类是卤碳化合物。

表 18-27 给出了部分基体物质的热学性质[21]。

表 18-27 基体物质的热学性质

基体	扩散温度 T/K	溶点/K	沸点/K	蒸气压 10^{-3} mmHg 时的温度/K	熔化潜热 $L_f/(J \cdot mol^{-1})$	晶格能 $-U_0/(J \cdot mol^{-1})$	热导率 λ/($W \cdot m^{-1} \cdot ℃$)(20K)
Ne	10	24.6	27.1	11	335	1874	0.4
Ar	35	83.3	87.3	39	1190	7724	1.3
Kr	50	115.8	119.8	54	1640	11155	1.2
Xe	65	161.4	165.0	74	2295	16075	2
CH_4	45	90.7	111.7	48	971		0.1
SF_6		222.7	209.4（升华）				
N_2	30	63.2	77.4	34	721	6904	0.4
O_2	26	54.4	90.2	40	444		
Cl_2		172.2	239.1	118	6820	32400	
CO	35	68.1	81.6	38	836	7950	
NO		109.6	121.4	66	2310		
CO_2	63	216.6	194.6（升华）	106	8339	26987	
N_2O		182.4	184.7	99	6535	24267	
SO_2		197.6	263.1	138			
H_2S		187.7	212.5	104			
C_2H_6		89.9	184.5（升华）				
C_2H_4		104.0	169.5				
C_2H_2		191.4	189.6（升华）				
CF_4		89.2	145.2				
CHF_3		118.0	191.2				
$CClF_3$		92.2	191.8				
$CBrF_3$		105.2	215.4				
$CHClF_2$		113.2	232.4				
CCl_2F_2		115.2	243.4				
$CHCl_2F$		138.2	282.1		2736		
C_2F_6		172.6	195				
$CClF_2CF_3$		167.2	234.5				
$CClF_2CClF_2$		179.2	2770.0				
C_4F_8		231.8	267.4				

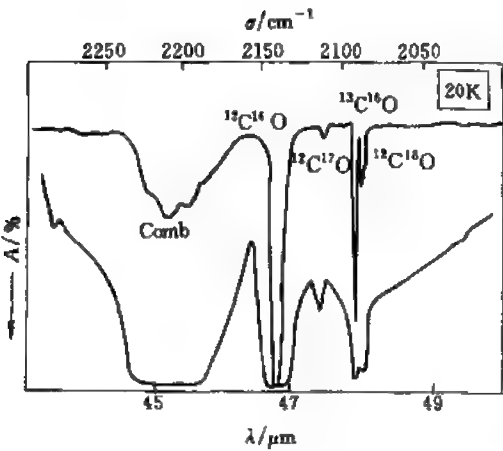


图 18-64 固体一氧化碳的红外光谱

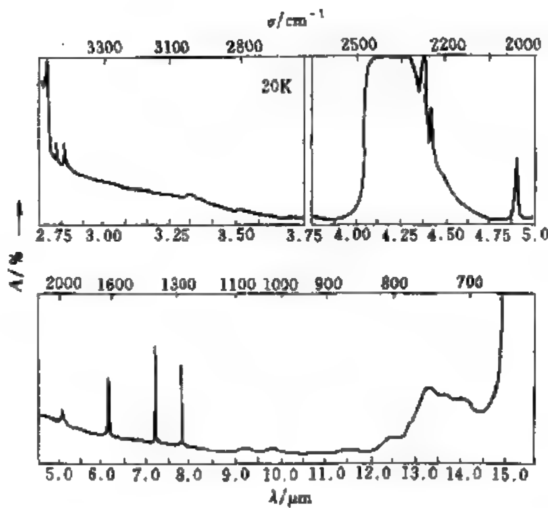


图 18-65 固体二氧化碳的红外光谱

作为基体物质的稀有气体在中红外区无振动吸收，在远红外区有晶格振动吸收。同核原子分子，氮，氧和氯分子无红外振动吸收，但有晶格缺陷时，O_2 在 $1671cm^{-1}$，$1591cm^{-1}$ 和

1549cm^{-1}处有吸收带，N_2 在 69cm^{-1}和 49cm^{-1}，Cl_2 在 88cm^{-1}和 60cm^{-1}处有吸收带。

其他一些基体物质的红外光谱示于图 18-64 至图 18-69[21]。

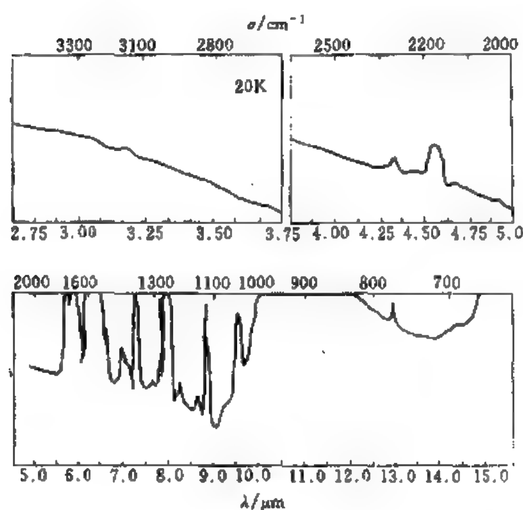


图 18-66　固体六氟化硫的红外光谱

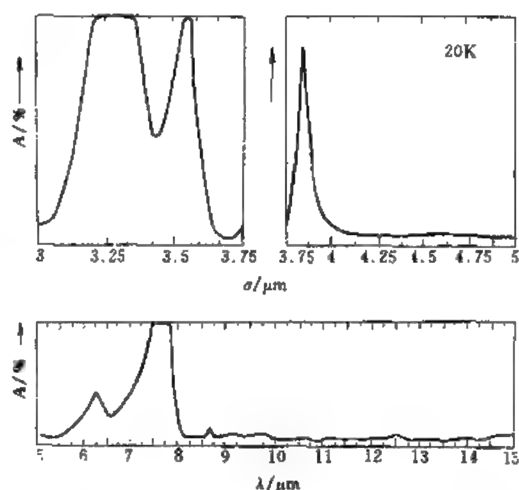


图 18-67　固体甲烷的红外光谱

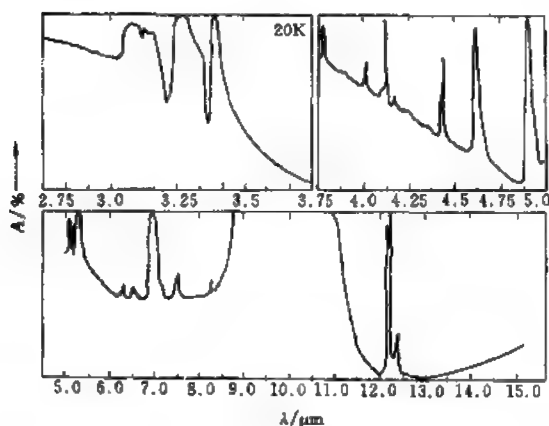


图 18-68　固体乙烯的红外光谱

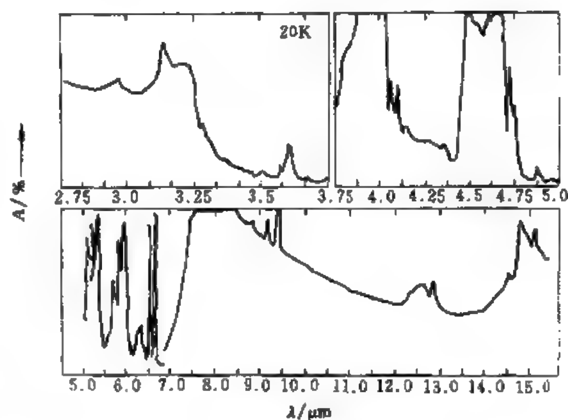


图 18-69　固体四氟甲烷的红外光谱

七、红外光谱联用技术简介[10,21,76]

红外光谱联用技术包括气相色谱-傅里叶变换红外光谱联用（GC-FTIR），液相色谱-傅里叶变换红外光谱联用（LC-FTIR），薄层色谱-傅里叶变换红外光谱联用（TLC-FTIR），超临界流体色谱-傅里叶变换红外光谱联用（SFC-FTIR）和热失重-傅里叶变换红外光谱联用（TGA-FTIR）等。多种仪器的联用将能更好地弥补各自的不足，因而出现了气相色谱-质谱-傅里叶变换红外光谱三机联用技术。HP 公司于 1987 年率先推出了三联机产品 GC-IR-MS。红外光谱联用技术的发展将使复杂混合物的分析提高到更高的水平。

（一）GC-FTIR

傅里叶变换红外光谱仪的趋于成熟以及在 70 年代中期两项关键技术：窄带汞镉碲（MCT）液氮低温光电检测器和内壁镀金硼硅玻璃光管的问世使 GC-FTIR 进入了实用阶段。80 年代初，毛细管气相色谱与 FTIR 的联用成功，使这一联用技术取得了迅速的发展，已被广泛用于化工、环保、能源、生化、医学、冶金等领域。

1. GC-FTIR 系统

GC-FTIR 联用系统主要由色谱单元、接口装置、傅里叶变换红外光谱单元和计算机数据系统组成，其原理示意图如图 18-70 所示。被分离的色谱单元组份按保留时间顺序进入光管，并被 MCT 检测，计算机数据系统存贮采集到的干涉图信息，经快速傅里叶变换得到组份的气相红外光谱图，进而通过谱库检索。

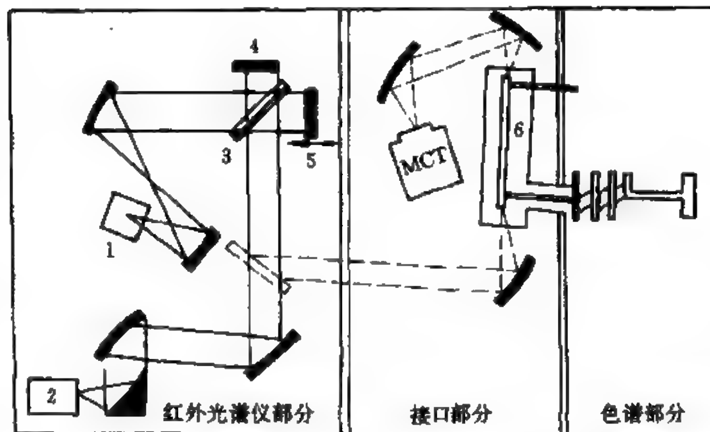


图 18-70 典型的 GC/FTIR 系统示意图[103]

1—光源；2—检测器；3—分束器；4—定镜；5—动镜；6—光管

光管与 GC，FTIR 之间的连接方式大体上可分为二种，使用填充柱，热导检测器时按图 18-71 方式连接；使用毛细管柱，氢焰离子化检测器 时按图 18-72 方式连接。前者是一种非破坏性连接方式，后者是破坏性连接方式。两种方式在联用中都同时获取色谱图，由此得到的保留值可作为红外光谱定性的重要辅助参数。

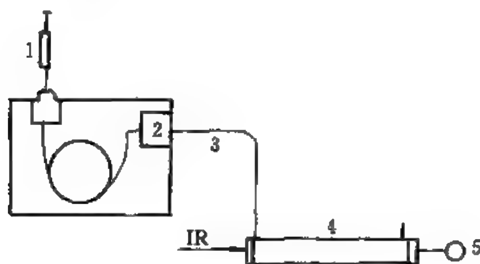


图 18-71 TCD 连接方式[46]

1—进样器；2—热导池；3—传输线；4—光管；5—MCT 检测器

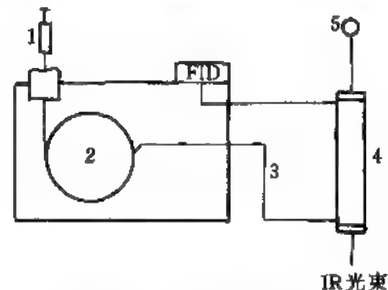


图 18-72 FID 连接方式[49]

1—进样器；2—色谱柱；3—传输线；4—光管；5—MCT 检测器

连接问题十分重要，必须注意以下问题：尽量减小流路系统死体积，传输线尽量短或不用；直接把色谱柱接到光管入口上，其内径与柱内径匹配；传输线也要精确保温，温度与柱温相同或稍高；光管与色谱柱连接应便于拆卸，切勿在联机状态下老化色谱柱，以免光管受污，确保流路系统不漏不堵。

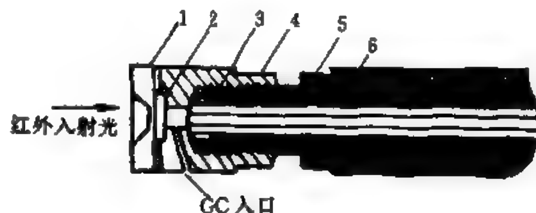


图 18-73 光管的结构

1—窗架；2—KBr 窗片；3—密封件；4—管帽；5—光管支架；6—光管

2. 光管[75]

目前在联用技术中普遍采用的是 L. A. Azarraga 等开发的光管，它是一根内壁镀金，反射率极高的硼硅玻璃管，两端装有红外透明 KBr 窗片，并用耐高温垫圈密封，光管两端各有一个色谱流出物的流入和流出孔道，分别经内衬玻璃钢的不锈钢管传输线与 GC 毛细管柱和 GC 的 FID 检测器相接。

光管的结构如图 18-73 所示。

从光谱学角度看，光管是一个流动气体吸收池，其光学性能影响系统的灵敏度。IR 光束在光管内不是直线通过，而是在光管内壁经多次反射后再透射。

光管的实际透过率 T 为：

$$T=R_W\cdot\left(\frac{D}{D_t}\right)^2\cdot R^{(2L/D)\ln|\cos(\theta/2)|} \tag{18-16}$$

式中，T 为入射干涉光的透过率；R_W 为窗片反射损失；D 为光管内径；L 为光管长度；D_t 为入射到光管窗口上光束直径；R 为管壁镀层的反射系数；$(\theta/2)$ 为入射半角。

要获得最大透射能量，必须调整上式中各参数，增加光管长度，减小内径，将提高联机检测灵敏度。但是，光管过长，能量衰减过大，光管过细，入射半角增大，使一部分光能损失在光管外，减少了透射能量，因此，光管应有一个合适的 L/D。入射光束直径要与光管内径相匹配，使入射半角为零。某些商品光管的几何尺寸见表 18-28。

表 18-28　光管的几何尺寸

光管类型	内径 ϕ/mm	L/m	V/ml
填充柱用光管	3	40	2.83
	2	60	1.88
毛细管柱用光管	1	10	0.078
	1	20	0.156
	1	40	0.312

一般说来为获得良好的分辨，可选用细径短光管，为获得较高的灵敏度，可选择长光管。

从色谱角度看，光管是其流路的一部分，它不具备分离能力，可视为死体积。因而，联用系统的分辨并不等于色谱的分辨，而是由光管中试样组份是否单一来决定。对使用者来说，往往光管已确定，为获得最佳分辨率和灵敏度，必须和色谱柱及色谱操作条件相匹配。更明确地说，就是要使光管容积与 GC 馏出峰相匹配。

Griffiths 认为，光管的体积和 GC 馏出峰半宽体积相当，即 $V_{\frac{1}{2}}$ 等于或略大于 $V_{光管}$ 时才能获得最佳分辨率和灵敏度。因复杂试样各组分 $V_{\frac{1}{2}}$ 往往相差很大，故取其平均值 $\bar{V}_{1/2}$，即

$$\bar{V}_{1/2}\geqslant V_{光管} \tag{18-17}$$

如果 $\bar{V}_{1/2}< V_{光管}$，光管内可能同时存在 2 个或 2 个以上的色谱峰，使系统分辨率降低。

3. 色谱柱和 GC 参数及操作条件选择

根据试样选取涂覆不同固定相的色谱柱和柱型。填充柱容量大，分辨率差，适于组成相对简单的混合物和痕量分析。毛细管柱可提供最大可能的分辨，多用于组成复杂的混合物分析。粗径厚膜柱既保持了毛细管柱的优点，又具备较大的柱容量，近年来发展很快。目前广泛采用的多为弹性石英管柱——涂壁开口管（WCOT）柱（wall coated open tubular），用于联机的规格主要有三种，见表 18-29 。

表 18-29　涂壁开口管柱的规格

规　格	内径 ϕ/mm	柱长 l/m	膜厚/μm
细径柱	0.18～0.25	25～50	0.1～0.2
中径柱	0.32	20～30	0.5～1
粗径柱	0.53	10～25	1～5

联机运行时常用的 GC 参数及操作条件归纳在表 18-30 中，可供参考。

若光管的几何尺寸为 40cm(长)×ϕ3mm(内径)，其容积为 $V_{光管}=\pi R^2L=3.14\times(0.15)^2\times 40=2.83$ml，由表 18-31 可知，它必须使用填充柱，而几何尺寸为 40cm（长）×1mm（内径）的光管，其 $V_{光管}=0.312$ml，所以必须使用粗径 WCOT 柱。有时对于所采用的光管，未必能满足式（18-17），另外还需考虑到传输线的影响，若传输线的内径不同于毛细管柱内径，载气进入传输线时平均线速度将大为降低，使经色谱柱分离的组分在传输线中返混。为确保光管中的分辨能保持色谱柱的分辨，载气在传输线中的平均线速度 $\bar{u}_T$ 必须略大于或等于载气在毛细管柱中的平均线速度 $\bar{u}_c$，即

表 18-30 联机常用 GC 参数及操作条件选择

色谱柱分类	膜厚/μm	进样量/μl	载气体积流速/(ml·min⁻¹)	升温速度/(℃·min⁻¹)	峰容量	峰含量/μg	柱效理论板	分辨	出峰时间/s	分析对象	备注
填充柱 内径(2～3)mm L(1～3)m	填料	可大于5	30～50	恒温操作	(2～15)ml	小于50	小于 5×10^5	差	大于5	简单混和物	填充柱 GC/FTIR
细柱 WCOT 柱 内径(0.2～0.25)mm L(20～50)m	0.1～0.2	小于1	0.5～2	大于4	小于100μl	小于0.1	大于 10^4	好	1～4	复杂试样	常用于联机
中径 WCOT 柱 内径 0.32mm L(20～30)m	0.5～1	小于2	1～3	小于5	小于300μl	小于0.2	大于 5×10^3	较好	2～5	复杂试样	常用于联机
粗径 WCOT 柱 内径 0.53mm L(15～20)m	1～50	小于5	2～5	小于5	大于300μl	小于1	小于 2×10^4	中等	3～7	较复杂试样	较常用于联机

$$\bar{u}_T \geqslant \bar{u}_c$$

为防止在光管中发生色谱峰返混，可采用尾吹技术，即在柱后与光管人口前加上旁路尾吹气。尾吹有利于系统分辨，但会减小灵敏度，尾吹量的变化对系统分辨和灵敏度都有影响。最佳尾吹量应使 $\bar{V}_{1/2} \geqslant V_{光管}$，需视试样，柱径，光管内径而定。对组成简单或保留时间相差较大的样品，可不加或少加尾吹，如 0.8ml·min^{-1}；对复杂样品，各组分保留时间相差很小，需适当加大尾吹量；对细径短光管和粗径柱，以加（1～3）ml·min^{-1}的尾吹为宜，中径柱加（2～4）ml·min^{-1}，细径柱可更大些，如 6ml·min^{-1}。在实验中，应仔细调节尾吹量，尾吹量应兼顾整机的分辨和灵敏度。

4. GC/FTIR 联机检测中的 FTIR 光谱仪

满足联机要求的 FTIR 光谱仪至少要达到以下两个要求：麦克尔逊干涉仪每秒钟内至少扫描 4 次，扫描速度越快，对 GC 峰分割测量越细致，对系统分辨有利，扫描速度是由动镜速度决定；要求检测器有足够高的灵敏度，GC/FTIR 系统多采用窄带 MCT。目前正在发展一种具有细光束、小面积的检测器的 FTIR 光学系统，可较大的提高系统灵敏度。

5. GC/FTIR 数据采集和处理

联机操作的第一步就是在计算机软件控制下完成数据采集。数据采集有二种方式：连续采集方式和“阈值方式”采集。采集前首先设置操作参数，如扫描速度，采样点数，变换点数，吸光度阈值等。例如一个 20min 的色谱过程，假如每种干涉谱扫描 2 次，将产生 2400 个干涉谱，如要求光谱分辨率达 4cm^{-1}，每个干涉谱需取 4096 个数据点，如此多的数据点要收集、存贮，并经处理产生化学图，重建色谱图，将干涉谱变换成光谱并作谱库检索。

（1）官能团色谱图　官能团色谱图亦称化学图（Chemigram）、红外图（Infragram）和吸收图（Absorptiogram），这是一种以收集的全部光谱信息中选取感兴趣的基团信息加以显示的方法，作用类似于色谱的官能团检测器。如含羰基的化合物的羰基的特征吸收一般在（1680～1800）cm^{-1}，当窗口设在这一区间，则被分离的组分中只有含羰基组分才出现信号。化学图的横坐标为随时间变化的光谱文件号或时间，纵坐标为强度。“化学窗口”是根据试样的光谱特征和分析需要人为设置的，最多可以设置 5 个或 5 个以下的窗口，可以同时得到 5 个或 5 个以下的“官能团色谱图”。图 18-74 为 GC/FTIR 采集的某 6 组分混合试样的官能团色谱图，从中可以看出试样由多少组分组成，含哪些基团，属哪些化合物，进而可依据文件号调出其光谱图作深入分析。

（2）重建色谱图　重建色谱图是类似于传统色谱检测器（如 FID）产生的色谱图，它有两

类，一是吸收重建，另一类是干涉图重建，这是一种利用 Gram-Schmidt 矢量正交化方法直接从干涉图取样而建立的色谱图（简称 GSR）。与化学图不同，它不是实时的，且数学过程复杂，但由于信噪比高而被广泛采用。Gram-Schmidt 重建色谱图横坐标是时间，可表征保留时间，可与色谱图直接比较。由于不同类化合物的红外总吸收度不同，以及取样方法不同（连续采集方式或阈值采集方式）和 GC/FTIR 系统在流路上死体积大等原因，该图的峰面积不代表组分真实含量，仅在连续采集方式下可表征保留时间。IR 重建色谱图的混峰比 GC 多。

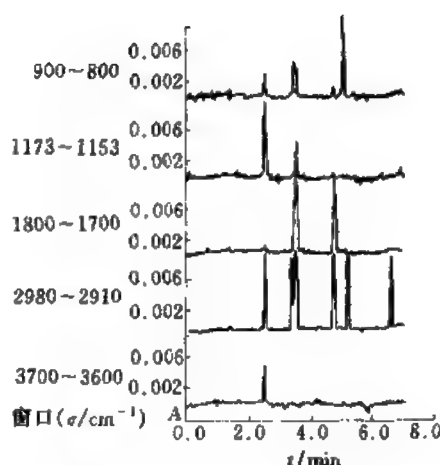


图 18-74　某混合物的化学图

(3) FTIR 光谱图的获得　在 GC/FTIR 联机检测可得到二类 FTIR 光谱：一是在采集干涉图时，在荧光屏上实时显示的低分辨 FTIR 光谱（16cm^{-1}），它不存贮在磁盘上；另一是数据采集结束后，通过快速傅里叶变换获得的中分辨红外光谱（2cm^{-1}或 4cm^{-1}）。所得光谱通过谱库检索确认，仪器厂家均向用户提供专用气相红外光谱库。目前已建立的气相红外谱库有 EPA 气相谱库（4100 张），Sadtler 气相光谱库（9200 张），Aldrich 气相光谱库（6600 张）和 Nicolet 气相光谱库（8654 张），尚不能满足需要。也可应用人工智能红外光谱解析系统，如 PAIRS 和 IRIS。当联机检测是针对某些官能团时，可采用窗检索法或利用化学图。

气相红外光谱不同于凝聚相红外光谱，其主要特点有：气相中分子之间的氢键断裂，及其他相互作用（如偶极子缔合）的减弱，使相应的谱带强度降低，宽度减小，谱带向高波数位移；受氢键影响者例外。气相红外光谱谱带一般比凝聚相红外光谱谱带较宽，这是由于前者有谱带转动结构；气相红外光谱一般比凝聚相红外光谱简单。

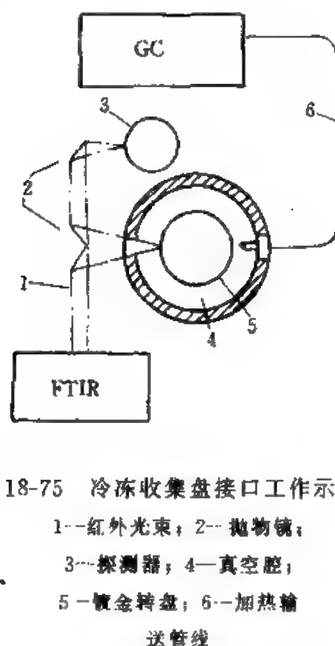


图 18-75　冷冻收集盘接口工作示意图
1—红外光束；2—抛物镜；
3—探测器；4—真空腔；
5—镀金转盘；6—加热输送管线

6. GC-FTIR 中的 Cryolect 接口和“冷冻窗”式接口

(1) Cryolect 接口　这是基于使色谱馏分在低温冷冻盘上形成“基体隔离”样品，再进行红外光谱测定的联用方法。这种接口已于 1984 年被 Mattson 公司商品化并命名为 Cryolect，其工作原理示于图 18-75。工作时冷冻盘（12K）慢慢转动，因此，被载气中 Ar 基体隔离的馏出物就呈宽度约为 0.25mm 的薄带沉积在收集盘的镀金侧面上，然后进行红外光谱测定。

(2) “冷冻窗”式接口（Tracer）　在 Griffith 等研究基础上，Bio-Rad 公司生产一种“Tracer”附件。“冷冻窗”是透红外的 ZnSe 板，采用液氮作冷冻剂（77K），工作时处于真空 1.33×10^{-3}Pa 和 77K，其移动速度随 GC 峰宽而变化，当从毛细管柱出来的气相物质射向冷冻窗时，馏分在冷冻窗上呈直径约 0.1mm 的斑点，采用聚光器和小面积高灵敏度的 MCT 探测器测定光谱。由于测定的是凝聚态的红外光谱，因此为使用

比气态光谱库大得多的凝聚态的标准谱库创造了条件。

（二）HPLC-FTIR

高效液相色谱与红外光谱联用的主要困难是色谱流动相在红外区有强红外吸收，这使实现 HPLC-FTIR 比 GC-FTIR 要困难。由于 HPLC 不受样品挥发度和热稳定性的限制，特别适于沸点高，极性强，热稳定性差的物质分析，所以它是 GC-FTIR 的一种重要的互补手段。

1．HPLC-FTIR 系统

HPLC-FTIR 联机示意图如 18-76 所示，它由色谱单元、接口、流动池或喷雾集样装置，FTIR 单元和计算机数据系统组成，其中接口问题至关重要。

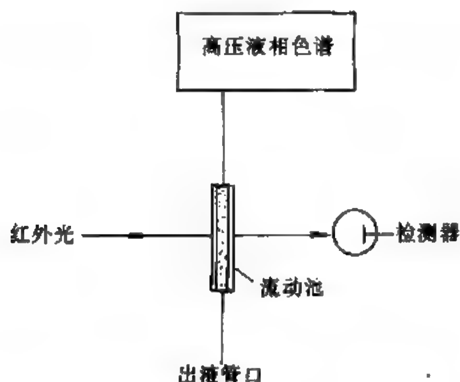


图 18-76　LC/FTIR 联机方框示意图

2．HPLC-FTIR 的接口

近年来在 HPLC-FTIR 的接口技术上获得了一些重要进展，接口方法可分为流动池法和流动相除去法两大类。

(1) 流动池法[76~83]　其原理是首先把色谱流出物顺序导入流动池，进行红外检测，然后将获得的流动相和样品的叠加光谱作差谱处理，取得样品光谱。流动池的形式有：平板式透射流动池，柱式透射流动池，柱内 ATR 流动池等，表 18-31 给出了一些商品流动池的规格[10]。因样品在流动相中浓度很低，溶剂的 IR 信号比样品分子信号强几百倍，在用计算机差谱技术时很难扣除溶剂信号，该法应用受到很大限制。

表 18-31　商品 HPLC-FTIR 流动池

商　品　名（制造厂）	光程长/mm	有效体积/μl
Micro Liquid（Harrick Scientific）	0.2	0.2
Ultra micro Flow-Through（Wilkes-Foxboro）	1.5	4.5
Micro Demountable Flow-Through（Spectra-Tech）	0.15～1.0	0.15～10.1
Flow-Through Micro Cavity（Spectra-Tech）	0.5～1.0	0.2～4.0
Zero Dead Volume（ZDV）Flow（Spectra-Tech）	0.5；1.0	1.2；5.0
Micro CIRCLE（Spectra-Tech）	ATR	25.0

(2) 流动相去除法　该接口方法是通过物理或化学方法将流动相去除，并使样品依次沉积在某种介质上，再检测其红外光谱，这种接口已报道的形式有：用于正相分离系统的接口装置包括漫反射转盘[84]，缓冲存储（buffer memory）装置[85]，连续雾化接口装置[86]等；用于反相分离系统的接口装置包括连续萃取式漫反射转盘[87]，加热雾化接口装置[88]，金属网式接口装置[89]，金刚砂式接口装置[90]，反应喷雾接口装置[91]，同心流雾化（concentric flow nebulizer）接口[92]，单分散气溶胶发生器接口等[93]。

（三）TLC-FTIR

TLC-FTIR 方法有以下 3 种类型

1．原位 TLC-FTIR[94]

该方法是采用红外漫反射光谱（DRIFTS）测定法对 TLC 板上的色谱斑点进行直接检测。由于 TLC 的固定相均有强的红外吸收，因此联机检测所得光谱图其光谱信息受损或吸收带严重畸变。

2．光声光谱（PAS）检测法[95]

该法将 TLC 板上的附着有分析物的固定相依次转移到 PAS 附件中进行 FTIR/PAS 测定，然后用差谱方法扣除固定相吸收，得到样品红外谱图，由于固定相的强红外吸收，对样品的光谱产生强烈干扰。

3. 自动洗脱物转动方法[96,97]

该方法是利用洗脱物转移接口自动将 TLC 板上的分析物经金属蕊丝转移到 KCl 粉末中，然后用 DRIFTS 方法检测各分析物的红外光谱。该法可除去固定相的干扰，是目前 TLC/FTIR 的首选接口方法。该接口装置已由 Analect 公司生产，其商品名为 Chramalect™。Yamamoto于 1991 年报道了以相似原理设计的自动洗脱物转移接口[98]。该方法需要特殊设备使用不便，目前 TLC 与 FTIR 仍间接联用，即从 TLC 上将样品洗脱后，除去溶剂，再作 FTIR 分析。

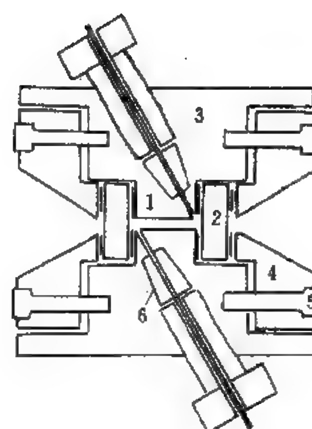


图 18-77 SFC-FTIR 所用的流通池示意图

1—不锈钢光管；2—盐窗；3—槽体；4—窗片压紧件；5—螺栓；6—石墨垫圈

（四）SFC-FTIR[99]

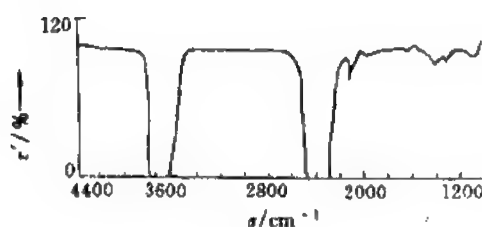


图 18-78 CO_2 的红外光谱

8258kPa，50℃，光程长度 1cm

SFC-FTIR 是当今倍受重视的联用分析技术之一，超临界流体色谱其自身具有许多独特优点，再加上超临界流体不会对红外光谱产生干扰，因而它兼有 GC-FTIR 和 HPLC-FTIR 的优点，又避开了前两者的不足之处。超临界流体色谱与红外光谱联用的首次实验是由夏菲和格里菲斯等于 1983 年进行，采用流动池接口。次年，又采用流动相去除式接口。

1. 高压流动池接口

高压流动池接口的基本结构如图 18-77 所示。设计流动池时要兼顾色谱和光谱分析两方面的要求。通常流动池内径为（1～0.5）mm，光程长为（10～4）mm，其体积在（8～0.8）μl，这远大于色谱要求的理想体积（100nl），可采用在流动池入口前补充流体方法改善。池窗材料为 ZnSe、CaF_2、NaCl 晶片等。窗片由密封圈紧固，能耐受最高工作压力。当一个色谱峰流入池内时，由红外光谱仪获得流动相与样品的叠加光谱，经差谱处理后得样品谱图。超临界流体色谱大多采用 CO_2 为流动相，超临界 CO_2 的红外光谱如图 18-78 所示。由 SFC-FTIR 获得的红外光谱图与其相应的气相或凝聚相光谱图有所不同，尤其是对于极性化合物更甚，使用凝聚相谱库检索谱图时会出现失配，而使用气相谱库时要好一些。

2. 流动相去除式接口[100]

由于超临界流动相在室温下的高挥发性，故一些 HPLC-FTIR 的流动相去除式接口如缓冲存储接口等稍加改动即可用于 SFC-FTIR，还可省去加热去除残留溶剂的步骤，其基本结构如图 18-79 所示。由限流管流出的各色谱组分在介质上沉积下

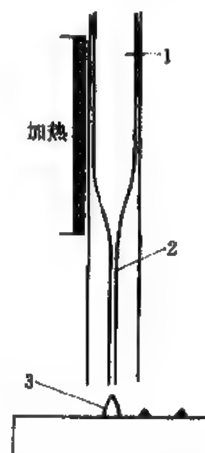


图 18-79 SFC-FTIR 中流动相去除式接口的基本结构

1—50μm 毛细管柱；2—锥形限流管；3—沉积斑点

很小的斑点，所用介质为 ZnSe、KBr、NaCl 晶片或圆盘，光滑的金属镜面或 KBr 粉末等。依据介质的不同，可分别采用透射法，反射-吸收法或漫反射法测定红外光谱，因色谱斑点可控制很小，可方便地使用红外显微镜进行检测。另一类是由 Griffiths 等将 Digilab 的 Tracer GC-FTIR 接口稍加改动后用于 SFC-FTIR 中[101]。

毛细管 SFC 的另一优点是可实现同基体隔离红外光谱联用。由于 SFC 技术本身的一些缺点，如超临界流体种类选择的局限，近年来发展甚慢，影响了 SFC-FTIR 的推广应用。

（五）TGA-FTIR[102~107]

早在 1967 年，就有人开展了 TGA 与红外光谱联用研究，FTIR 光谱仪问世，推动了 TGA-FTIR 的发展。TGA-FTIR 在线联用系统的连接框图如图 18-80 所示，它主要由热解室（TGA 热解炉），接口（包括传输管线）和 FTIR 光谱仪组成。

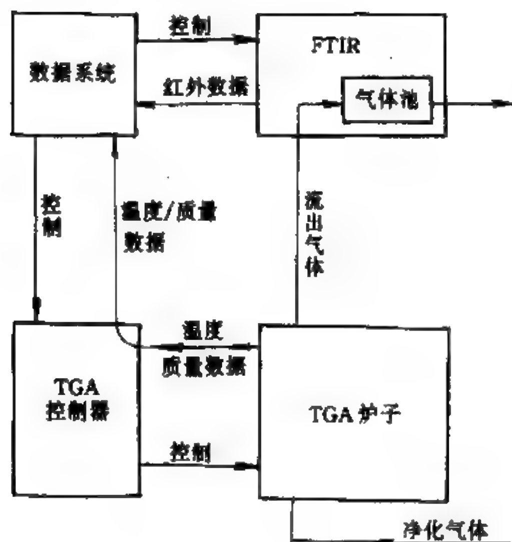


图 18-80 TGA-FTIR 连接框图

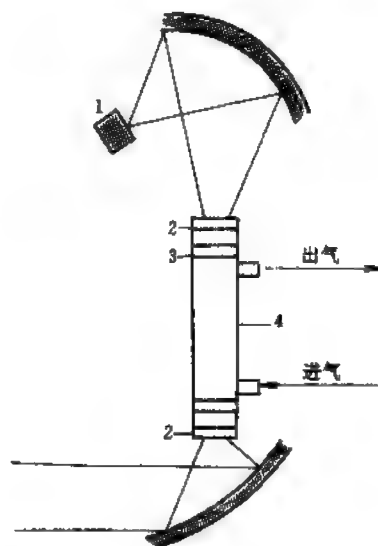


图 18-81 TGA-FTIR 接口示意图
1—探测器；2—KBr 外层保温窗片；
3—ZnSe 耐蚀窗片；4—加热的气体池

已报道的接口装置有 3 种形式，常规红外气体池，光管接口和 TGA-FTIR 专用接口。TGA-FTIR 中使用的光管如图 18-81 所示，该光管带有防止水汽凝聚的双窗口，TGA-FTIR 专用接口示意图如图 18-82 所示。

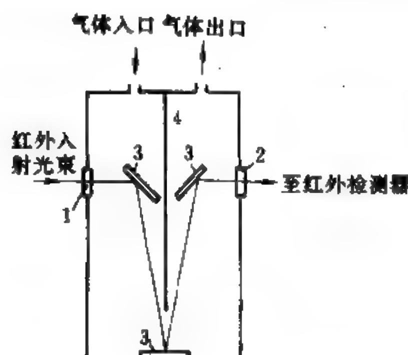


图 18-82 TGA-FTIR 专用接口示意图
1—入射窗口；2—出射窗口；3—反射镜；
4—分隔板

TGA-FTIR 联用中使用的操作软件可显示 3 种出峰谱图：放出气体分布图（evolved gas profile，简称 EGP），它是测定总吸收对时间的变化曲线；官能团分布图（functional group profile，FGP），它是测定在一小的频率窗口内积分吸收值对时间变化曲线和特定气体分布图（specific gas profile，SGP），这是频率窗口缩小到只对某一特定成分的积分吸收值对时间的变化曲线。近年来热解进样器与 GC-FTIR 联用在高分子材料分析中得到很

好的应用。

八、红外光声光谱技术简介[10,21]

早在1880年Bell就报道了光声效应，近一个世纪后，Rosencwaig设计了第一个非共振光

3. FTIR-PAS 光谱仪的典型操作参数

镜速：0.05，0.1，0.25cm・s^{-1}；

分辨率：8 或 16cm^{-1}；

光孔：最大；

光谱范围：(4000～400) cm^{-1}；

扫描次数：32～400。

（二）固体试样光声光谱的理论简介

Rosencwaig 和 Gersho[108]用扩散方程讨论了光声信号（即 RG 理论），其热扩散方程的解 Q 是十分复杂的。Rosencwaig 等根据试样厚度 l 与热扩散长度 μ_s 的大小比较，分为 $\mu_s>l$，$\mu_s\approx l$，$\mu_s<l$ 3 种情况，又根据试样的吸光系数 β，即光的穿透深度 $\mu_\beta=1/\beta$ 与 l 的大小比较，分为两类，共计 6 种情况，现汇总于表 18-32。

表 18-32　在六种情况下热扩散方程的解 Q

光学透明试样 $\mu_\beta>l$	(1) 热薄试样 ($\mu_s\gg l$；$\mu_s>\mu_\beta$)	$Q\approx\frac{(1-j)\beta l}{2a_g}\left[\frac{\mu_b}{K_b}\right]Y$	光声信号与 βl 成正比，且随 ω^{-1}成比例变小
	(2) 热薄试样 ($\mu_s>l$；$\mu_s<\mu_\beta$)	$Q\approx\frac{(1-j)\beta l}{2a_g}Y$	光声信号与 βl 成正比，且也随 ω^{-1}成比例变小
	(3) 热厚试样 ($\mu_s<l$；$\mu_s\ll\mu_\beta$)	$Q\approx-j\frac{\beta\mu_s}{2a_g}\left[\frac{\mu_s}{K_s}\right]\left[\frac{\mu_b}{K_b}\right]Y$	光声信号与 $\beta\mu_s$ 成正比，光声信号调制关系正比于 $\omega^{-3/2}$，(3)与(1)，(2)的差别在于对频率依赖关系不同
光学不透明试样 $\mu_\beta<l$	(1)热薄试样 ($\mu_s\gg l$；$\mu_s>\mu_\beta$)	$Q\approx\frac{(1-j)}{2a_g}\left[\frac{\mu_b}{K_b}\right]Y$	光声信号与 β 无关，只与光源强度成正比，这时信号非常强，依赖于支撑台材料的热学性质，并且随 ω^{-1}而变化
	(2)热厚试样 ($\mu_s<l$；$\mu_s>\mu_\beta$)	$Q\approx\frac{(1-j)}{2a_g}\left[\frac{\mu_s}{K_s}\right]Y$	光声信号仅与试样的热学性质有关，因与 β 无关，所以光声光谱不能反映试样的光谱性质，对 ω^{-1}有依赖关系
	(3)热厚试样 ($\mu_s\ll l$；$\mu_s<\mu_\beta$)	$Q\approx\frac{-j\beta\mu_s}{2a_g}\left[\frac{\mu_s}{K_s}\right]Y$	尽管试样不透明，光声信号仍正比于 β，信号也依赖于样品的热学性质，且随 $\omega^{-3/2}$变化，光声谱反映试样的光谱特性

表 18-32 中热薄试样表示对热传导来说是薄的试样，热厚试样即为对热传导来说是厚的试样。上表公式中 μ_b 为背景材料的热扩散长度，K_b 为其热导率，Y 是样品池的光学窗片到样品表面距离，a_g 为气体的热扩散系数，ω 是光源调制角频率，K_s 是试样的热传导率。

在所谓光学上透明的试样时，光声谱的独特本领就是能得到样品内部光吸收沿深度的剖面图。此时，调制频率和 μ_s 值决定表面以下热有效传导和能被检测的深度。若调制频率大[(10000～100000) Hz]，μ_s 很小，则光谱主要是表层信息。降低调制频率，热扩散长度 μ_s 增加，光谱将反映样品内层的信息。光声光谱对深度剖面分析的本领，提供了研究层状和非晶态材料以及确定涂层和薄膜厚度的可能性。对于光学不透明样品，当 $\mu_\beta<\mu_s$，光声信号与 β 无关，此时入射的光辐射全部被吸收，产生所谓"光声饱和"的光声谱，它反映的是光源的功率光谱特性，而不是试样的光谱特性，当 $\mu_\beta>\mu_s$ 时，光声信号正比于 β。

九、近红外光谱技术简介[10,21]

（一）概述

近红外（Near-Infrared 或 NIR）谱区，其波长范围为（0.75～2.5）μm，波数为(13300～4000) cm^{-1}，该区主要是分子振动的倍频吸收与合频吸收。

由双原子分子非谐振子模型可以得到非谐振子能级 E 为

$$E=hc\sigma\left[\left(V+\frac{1}{2}\right)-X\left(V+\frac{1}{2}\right)^2\right]$$

式中，E 为能级能量值；h 为普朗克常量；c 为光速；σ 为波数；振动量子数 $V=0$，1，2，3，…；X 为非谐常数。非谐振子跃迁的选择定则是 $\Delta V=\pm1$，±2，…，即除了基频跃迁外也可能发生从基态到第二或更高激发态（$V=2$，3，…）之间的跃迁。这种跃迁称为二级倍频或多级倍频跃迁，产生的吸收谱带称为二级倍频或多级倍频吸收，总称为倍频吸收。多原子分子的振动可以看成是由许多简正振动组合而成，它们之间可能发生相互作用，使吸收峰频率近似于二基频的和或差，这种吸收叫合频吸收。近红外谱区的波数范围（13000～4000）cm^{-1}，因此该谱区包括基频吸收 2000cm^{-1}以上的二级倍频。三级倍频或合频吸收以及 1330cm^{-1}以上的三级倍频吸收。三级倍频吸收谱带强度太弱，故近红外谱区主要是含氢基团C—H、O—H、N—H 等的伸缩振动的二级倍频吸收谱带以及这些基团的伸缩振动与摇摆振动的合频吸收。由于分子振动的倍频吸收和合频吸收发生的机率很小，有机分子在近红外区的摩尔吸光系数大致在 $10^{\circ}L\cdot mol^{-1}\cdot cm^{-1}$以下，比中红外谱区小 1～2 数量级。

近红外光谱早在 1800 年已被 Herschel 发现，到 50 年代在经典定量、定性分析方面已得到较大发展，但由于其谱带的复杂性，往往不易归属，谱带强度又弱。当中红外分光光度计得到普遍使用时，在 60 年代后，近红外谱区分析一度较少受人注意，以致这个谱区被人称为"被遗忘的谱区"。另一方面，有人注意到近红外谱区分析在天然产物等复杂物质的快速成分分析方面的潜力，特别是近红外反射光谱法的发展，使近红外反射光谱法已成为分析农产品中的蛋白质，脂肪，水分，氨基酸，淀粉，油，纤维素等的重要工具。现在许多国家，如加拿大，美国等谷物出产大国，都已把近红外反射光谱分析谷物作为公认的方法，并得到普遍使用。这种分析方法目前在国际上受到了很大的重视。

近年来已刊载了许多有关论文，报告与评论，如有机物的近红外光谱，近红外定性定量分析，近红外药物分析，近红外反射光谱分析等。召开了多次近红外光谱分析国际会议，出版了多种近红外光谱分析专著。

（二）近红外光谱仪器

色散型近红外分光光度计往往和紫外可见区合在一台分光光度计中，上海第三分析仪器厂的 710 型分光光度计属于这类光谱仪，见图 18-86。

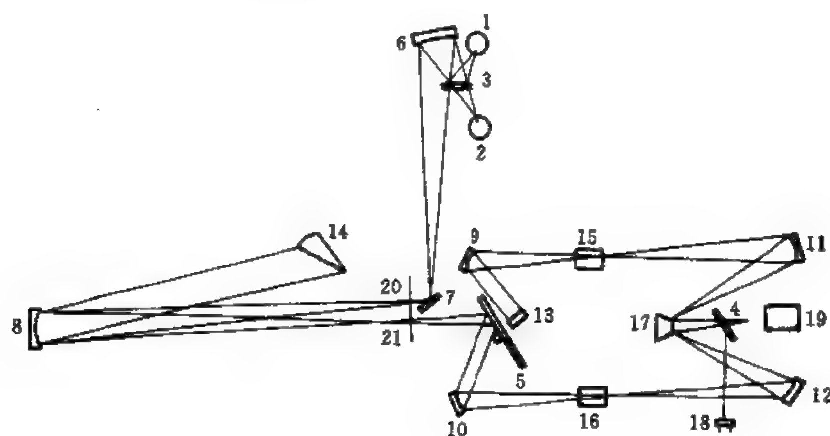


图 18-86　710 型分光光度计光路图

1—钨灯；2—氢灯；3、4—切换镜；5—旋转镜；6～13—反射镜；14—棱镜；15—参比池；16—样品池；17—合束棱镜；18—硫化铅检测器；19—光电倍增管；20、21—进、出口狭缝

二极管阵列检测器的使用使近红外光谱仪有了进一步的发展，利用硅二极管阵列的 NIR 光谱仪，其工作范围可达（14706～925）cm^{-1}，用 GaAs 二极管阵列的 NIR 光谱仪，可达 5882cm^{-1}，用电荷偶合器件（charge coupled device）阵列的 NIR 光谱仪可达（25000～10000）cm^{-1}。

傅里叶变换近红外光谱仪通常只需将用于中红外区的仪器更换光源、分束器及检测器并配合适用的软件就很易扩展到近红外区。

（三）近红外光谱法的应用简介

近红外定量分析技术已被广泛用于谷物、油料、饲料、食品以及药品等的分析。有关复杂样品近红外漫反射光谱分析的基本步骤请参阅文献[10]，这里仅给出其应用简表（表 18-33）。

表 18-33　近红外定量分析应用简表[21]

分析物名称	近红外分析的项目	分析物名称	近红外分析的项目
谷物		饲料	
硬粒小麦和软粒小麦	蛋白质、水分、油分	母牛、猪、家禽混和饲料	蛋白质、油分、水分、纤维素
硬粒小麦和软粒小麦粉	蛋白质、水分、灰分、颜色	混和饲料所用配料，鱼粉	蛋白质、油分、水分
小麦粗粉	蛋白质、水分、纤维、油分	骨粉和肉粉	蛋白质、油分、含肉量
麦麸	蛋白质、水分、纤维素、糖、淀粉	干草，青贮饲料，豆类	蛋白质、纤维
脱脂小麦芽	脂肪	食品	
大麦	蛋白质、脂肪、葡聚糖	面团	脂肪、水分、蛋白质
水稻	水分、油分	蛋类	蛋白质、水分、脂肪
燕麦	蛋白质、水分、油分	巧克力	脂肪、水分
玉米	蛋白质、赖氨酸、油分、纤维、淀粉	脱水蔬菜	水分
高粱	蛋白质、脂肪、水分、纤维	奶料，黄油，干酪	脂肪、水分、蛋白质
油料		冰琪琳	脂肪、总干物质总量
豆油	碘价、游离脂肪酸	猪肉，牛肉，鸡肉	蛋白质、脂肪、水分、色泽
人造黄油	油分、水分	香肠，火腿	蛋白质，脂肪，水分

十、远红外光谱技术简介[10,21]

（一）概述

目前普遍认为远红外光谱区间应为（400～10）cm^{-1}，由于（650～400）cm^{-1}和 400cm^{-1}以下红外谱带的性质，如谱带强度，谱带宽度和谱带分类等都十分相似，也可将远红外区间定为（650～10）cm^{-1}。

远红外区的振动模式大致分为 3 类：第一类是分子内部的振动，其中包括重原子之间的伸缩振动和弯曲振动，气体和液体分子的扭转振动及环状分子的环变形振动。第二类是分子间的振动，包括分子间的相互作用，如氢键振动等和晶格振动。第三类是气体分子的纯转动。远红外光谱仪及远红外光源，滤光片，分束器，检测器及远红外测试方法可参见本书有关章节。

（二）远红外光谱区域的吸收

各类物质的远红外吸收规律不像中红外区了解得清楚，远红外光谱的解释和谱带的指认要比中红外难得多。Bentley 在（660～285）cm^{-1}波段测定了 400 多种脂肪族化合物和芳香族化合物的远红外光谱，其后又发表了约 1500 种物质的远红外光谱。Miller 研究了大多数阴离子基团的远红外光谱特征，给出了它们的特征频率。中本一雄所著的无机和配位化合物的红外和拉曼光谱（第三版）一书中给出了大量无机化合物、配位化合物和有机金属化合物的振动频率，其中许多是落在远红外光谱区。

（三）远红外测量的影响因素和测量条件的选择

影响远红外测量因素包括：水蒸气的影响，来源于光源、检测器和分束器的光谱噪声，各种测试条件的影响。表 18-34 给出了 $4cm^{-1}$和 $8cm^{-1}$分辨率测得的水蒸气远红外吸收峰峰位。

表 18-34　$4cm^{-1}$和 $8cm^{-1}$分辨率测得的水蒸气远红外吸收峰峰位（σ/cm^{-1}）

$4cm^{-1}$	$8cm^{-1}$	$4cm^{-1}$	$8cm^{-1}$	$4cm^{-1}$	$8cm^{-1}$	$4cm^{-1}$	$8cm^{-1}$	$4cm^{-1}$	$8cm^{-1}$
625		492		353	353	227	226	133	
617	617	484	484	341		214		127	
600		473	472	336		208		122	123
593	594	458	458	327	325	203	205	106	
577	577	443	443	315		195		100	101
569	568	436		303	301	189		89	89
547	547	419	420	290		177	174	79	
536	536	397	397	280	279	170		74	75
527		384	384	266	266	158		56	57
517	517	376	374	255		151	151		
502	502	370		247	248	139	139		

用真空型 FTIR 仪器测量远红外光谱可除去水蒸气的影响，当用非真空（吹扫型）仪器时，须用干燥氮气、空气或液氮气化的氮气吹扫光学台，可采用样品穿梭器附件以保持光学台中水蒸气含量恒定。

在远红外测量中要求光源很稳定，采用液氦冷却的锗热辐射检测器，采用固体分束器以减小振动的影响。增加扫描次数是减少远红外光谱噪声的有效方法。

在进行远红外测量时，对测量条件的选择可归纳为：增加扫描次数，一般样品和背景需扫描（60～250）次；用 $4cm^{-1}$分辨，如仪器噪声大，可降低到 $8cm^{-1}$；扫描速度应比中红外扫描速度慢；常规测试的增益选 1，用外附件时，可选大一些的增益；光圈应开到最大；适当增加低通滤波器的数值，减小高通滤波器的数值。

（四）远红外光谱的应用

远红外光谱研究分子中的作用，包括测定分子的纯转动光谱，如 CO、H_2O、NO_2 和 NH_3 的远红外纯转动光谱；测定重原子间的伸缩和弯曲振动，如金属氧化物，硫化物，氯化物，溴化物及碘化物等，它是研究无机化合物，金属有机化合物和金属配位化合物性质的重要手段；测定气体或液体分子的扭转振动，研究有机化合物分子内部绕 C—C 单键旋转所出现的振动吸收；测定环状分子的环的面外弯曲或折叠振动。远红外光谱研究分子间的相互作用包括分子间氢键作用和晶格振动，研究晶格振动可以更好地了解固态晶体的振动类型是平动型还是摆动型。高聚物晶体的远红外光谱仅和晶带排列次序及高分子链的相互作用有关，故可根据远红外光谱变化直接了解高聚物结晶态的变化。

十一、红外发射光谱技术简介[10]

随着 FTIR 技术的发展，使 FTIR 发射光谱技术在物体表面，强腐蚀性样品，远距离加热或燃烧样品的定性和定量分析中得到应用。

（一）FTIR 发射光谱分析的测量方法

样品受热后产生的辐射特征与它的组分、温度和频率有关。样品发射率 $\varepsilon(\sigma)$ 与它的浓度 C 之间关系为

$$C=\frac{\lg[1-\varepsilon(\sigma)]}{K(\sigma)\cdot l}$$

或
$$\varepsilon(\sigma) \doteq 1-10^{-K(\sigma)l} \tag{18-18}$$
式中，$K(\sigma)$为吸收系数，l为光程长。

上式适用于气体和附着于低发射率基片上的凝聚相样品，由此可对样品定性或定量。

对于气体或凝聚相样品来说，直接测量$\varepsilon(\sigma)$是比较困难的，仪器测得的一个样品单光束光谱$S(\sigma, T)$包函来自各种光源发出的红外辐射对它的贡献。为此 Kember 和 Chase 提出在两个温度下各自测定样品和黑体的单光束光谱，对于黑体

$$S_1(\sigma,T_1)=R(\sigma)[H(\sigma,T_1)+B(\sigma)]$$
$$S_3(\sigma,T_2)=R(\sigma)[H(\sigma,T_2)+B(\sigma)]$$

对于样品

$$S_2(\sigma,T_1)=R(\sigma)[\varepsilon(\sigma)H(\sigma,T_1)+B(\sigma)+I(\sigma)r(\sigma)]$$
$$S_4(\sigma,T_2)=R(\sigma)[\varepsilon(\sigma)H(\sigma,T_2)+B(\sigma)+I(\sigma)r(\sigma)]$$

假设$\varepsilon(\sigma)$和$r(\sigma)$与温度无关，则有
$$\varepsilon(\sigma)=\frac{S_4-S_2}{S_3-S_1} \tag{18-19}$$
以上各式中：σ频率（波数）；T_1、T_2热力学温度(K)；$R(\sigma)$仪器响应函数；$H(\sigma,T)$Planck 函数；$\varepsilon(\sigma)$样品发射率；$r(\sigma)$样品反射率；$I(\sigma)$射到样品上的背景辐射；$B(\sigma)$直接射到检测器上的仪器背景。

若干涉仪和检测器都处于室温，就不必作温度T_2的测量，直接用S_2和S_1的比给出发射率$\varepsilon(\sigma)$，黑体也可以用样品支持体代替，给出“相对”发射率。

（二）红外发射光谱技术应用示例

一系列报道表明红外发射光谱是表面物种定性、结构和定量分析的好方法，如测定钢丝轮胎帘线和铜丝上残余润滑剂及喷气式飞机燃料沉积物分析等。FTIR 发射光谱可以作为原位观察摩擦过程中化学变化的有效方法。FTIR 发射光谱可用于催化剂的研究，它不仅可提供催化剂表面结构，还可提供表面物种，可研究催化剂的热分解特性。在高温下测量矿物的发射光谱以研究其热相变，测量低温矿石的 FTIR 发射光谱，揭示样品的精细结构，以直接鉴定块状矿物样品。利用农药样品的红外自辐射来检测微克量级的农药。曾用 FTIR 发射光谱对人体皮肤的色素沉着，感染部位的性质，分泌液的出现或消失等问题，进行非损伤性检查。利用发射光谱法遥测气体组分。

十二、动态红外光谱技术简介[10,21]

（一）概述

动态红外光谱技术是测定随时间而变化的样品红外光谱的一种手段。根据样品随时间变化的快慢，动态红外光谱测定可分为 3 种情况：一是假稳态测定，适于慢变化过程。第二种是快扫描测定，适于变化时间范围在秒的数量级($1\text{s}<t<600\text{s}$)。最后一类是通过时间分辨光谱技术测定，其变化是瞬态的，即短于光谱仪的扫描时间。时间分辨光谱可以得到瞬态分辨率小于 100μs 的光谱 。时间分辨光谱测定有 4 种采集方式：①步进扫描采样法；②慢扫描时间编组法；③快扫描时间编组法；④改进的时间编组法。在第一种方法中触发瞬态信号，每扫描一次只采集某一特定时刻t_1的红外信号，得到相应于这一时刻t_1的红外干涉图，为了得到另一时刻t_{i+1}的红外干涉图，重复上述扫描和触发，若需要取 100 个时间间隔，需重复 100 次，每一次扫描为提高S/N比还需通过多扫描累加。这种方法的优点是时间分辨率只受红外信号数字化速度限制，可达 1μs 的时间分辨率；缺点是与时间分辨率相匹配的机械截光的光栏

系统需高速运动，技术上困难；另外每一次扫描只采某一刻定时刻的光，其效率低。在时间编组法中当动镜在过零点时发出的触发脉冲不仅采取 t_1 的红外信号，也可以采集相应于 t_2，t_3，…的红外信号，这样动镜扫描一次，可以得到相应于 t_1，t_2，t_3，…的干涉点，之后计算机将各干涉图中相同时刻 t_2 的数据点提出来，重组一个新的干涉图。这种按一定方式“由计算机造出来”的干涉图上的所有数据都对应于特定时间 t_i，即反映了 t_i时间样品瞬态的干涉图。在快扫描时间编组法中是把每一次扫描外触发位置比前一次扫描向后移一个过零点的时间间隔 T_λ，扫描 n 次，使每一个 t_i 信号干涉图数据点补齐，这种采样方式，对于不同时刻（t_i）的干涉图不一样，它不适于研究周期长（>30ms）的时变过程。快扫描时间编组法适于研究周期较短（<1ms）也可以较长（>3ms）的瞬变信号，目前商品化仪器，大多采用这种方式。

（二）动态红外光谱应用示例

动态红外光谱技术应用于慢变化体系的研究有大气化学烟雾反应，表面吸附的光化学反应，聚合反应动力学的测定，生化反应动力学和机理研究；研究变温下结构变化，包括分子间的相互作用力、结晶和晶相转变；研究应变下聚合物结构。应用于快变化体系测定主要有色谱和 FTIR 联用，TGA 和 FTIR 联用等。时间分辨光谱的应用近年来发展很快，美国分析化学杂志 1994 年红外光谱学综述中有关时间分辨红外的文献有 21 篇，而 1996 年包含的文献有 102 篇，增长很快，其应用面更宽，详细情况可参阅有关文献。

参 考 文 献

1 Herzberg G. Molecular Spectra and Molecular Structure Vol Ⅱ：Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules，Van Nostrand，Princeton；N J，1945
2 Herzberg G. Molecular Spectra and Molecular Structure Vol 1：Spectra of Diatomic Molecules，Van Nostrand，Princeton，N J，1950
3 Woodward L A. Introduction to the Theory of Molecular Vibrations and Vibrational Spectroscopy，London：Oxford University Press，1972
4 Norman B C et al. Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy，Third edition，N. Y：Academic Press，1990
5 Hall L H. Group Theory and Symmetry in Chemistry，New York：McGraw-Hill，1969
6 Cotton F A. Chemical Application of Group Theory，2nd ed，New York：Wiley-Interscience，1971
7 Orchin M et al. Symmetry，Orbitals and Spectra，New York：Wiley，1971
8 Ferraro J R et al. Introductory Group Theory and Its Application to Molecular Structure，2nd ed，New York：Plenum Press，1975
9 王宗明等. 实用红外光谱学，北京：石油化学工业出版社，1978
10 吴瑾光主编. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用，上卷. 北京：科学技术文献出版社，1994
11 Wilson E B et al. Molecular Vibrations，N Y：McGraw-Hill Book Co，1955；N Y：Dover Publications，Inc，1980
12 Fuhrer H et al. Computer Programs for Infrared Spectrophotometry. Ottawa：NRCC，1976（NRCC Bulletin NO15）
13 Волькенштейн и ДР. Колебания，Москова：гостехадат，1949
14 Свердлов Л М и др，Колебательные Спектры Многоатомных Молекул. Москова：Наука，1970
15 Грибов лА. Методы ц Алгоритмы Выщслений В Теорцц Колебателых Спектрон Молькул. Москона：Наука，1981
16 Gribov L A，Orville-Thomas. Theory and Methods of Calculution of Molecular Spectra. N. Y：John-Wiley & Sons，1988
17 杭州大学化学系分析化学教研室编. 分析化学手册，第三分册，电化学分析与光学分析. 北京：化学工业出版社，1983
18 Willis H A. Laboratory Methods in Vibrational Spectroscopy，Third edition，Chichester：JOHN WILEY & SONS，1987
19 中华人民共和国国家计量检定规程 JJG681-90：色散型红外分光光度计. 1990
20 张叔良等编著. 红外光谱分析与新技术. 北京：中国医药科技出版社，1993
21 林林，吴平平等编著. 实用付里叶变换红外光谱学. 北京：中国环境科学出版社，1991
22 Self R. Nature，1961；189：223
23 Shearer D A，et al. Analyst. 1963；88：147
24 穗積啟一郎. 微量化学の手法. 化学，1981
25 蒋瑾华，刘布鸣等. 分析测试通报，1985
26 Corth A B. Chem and Indu，1967；26（52）：1782
27 Bissett F，et al. Anal Chem，1959；31：1927
28 田村喜藏等. 分析化学，1963；12：372
29 荆煦瑛，分析化学，1980；3（8）：269
30 Brannon W L. Microchim Acta，1970；2：237

31 Mills A L. Anal Chem, 1963; 35: 416
32 Black E D. et al. Anal Chem, 1957; 29: 169
33 Black E D. Anal Chem, 1960; 32: 735
34 Sparagana M et al. Anal Chem, 1962; 34: 242
35 Reffner J et al. American Lab, 1987; 19: 86
36 Turner P. Anul Proc, 1985; 23: 268
37 Bergin F. Appl Spectrosc, 1989; 43: 511
38 Gulfo A et al. American Lab, 1991; 23 (10): 36
39 Fishman and Drickamer. Anal Chem, 1956; 28: 804
40 Bradley C C et al. Nature, 1966; 211: 839
41 Ferraro J R. Coord Chem Rev, 1979; 29: 1
42 Wong P T T et al. Appl Spectrosc, 1985; 39: 377
43 Davies H W et al. Natl Bur Stand Sect, 1968; A72: 149
44 Christian S D et al. Appl Spectrosc, 1975; 30: 227
45 Hill R M, Christian S D. Appl Spectrosc, 1982; 36: 302
46 Chopelas A, Boehler R. AIRAPT Conf 9th SUNY, Albany, N. Y, 1983
47 Klug D D, Whalley E. Rev Sci Instrum, 1983; 54: 1205
48 Lowndes R P, Rastogl A. Phys Rev, B 1976; 14: 3598
49 Shermann W F. Bull Soc Chim France, 1982; 9-10: 347-1347
50 Hiramatsu N, et al. Appl Phys, Part 1, 1982; 21: 651
51 Morrow D R. Trans N Y. Acad Sci, 1968; 30: 1130
52 Fried J R, Li W. J Appl Polym Sci, 1990; 41 (5-6): 1123-1131
53 Wong PTT et al. Appl Spectrosc, 1985; 39: 733
54 Arakawa H et al Appl Spectrosc. 1986; 40: 884
55 Tapavicza st V et al. High Temp. High Pressures, 1975; 7: 539
56 Zhulin V M et al. Science, 1966; 153: 649
57 Brown R G. J Chem phys, 1964; 40: 2900
58 Ikawa S, Whalley E. J Chem phys, 1984; 81: 1620
59 Lewis S et al. Spectrochim Acta, 1979; 35A: 613
60 Wu Che-Kuang. J polym phys Ed, 1974; 12: 2493
61 Am. Lab 1980; 12 (3): 104
62 Ring wood A. Composition and Petrology of the Earth's Mantle, New York: McGraw-Hill, 1975
63 Bassett W A, et al. High Pressure Sci Technol. AIRAPT Conf, 1979; 2. 75 1977
64 王翠英，席时汉. 光学与光谱技术，1985；(2)：6
65 Chan M G, Allara D L. Polymer Eng Sci, 1974; 14: 12
66 Buffeteau T et al. Applied Spectroscopy, 1991; 45 (3): 380
67 Charney E J. Opt Soc Am, 1954; 45: 980
68 Koening J. L et al. J polym Sci, part A-2, 1967; 5: 301
69 Sung C S P. Macromolecules, 1981; 14: 591
70 Nafie L A, Diem M. Appl Spectrosc, 1979; 33: 130
71 Krishnan K et al. Appl Spectrosc, 1982; 36: 257
72 Sedman J, Butler I S. Appl Spectrosc, 1985; 39: 621
73 Davies P R. Dis Faraday Soc, 1969; 48: 181
74 周良模等编著. 气相色谱新技术，北京：科学出版社，1994
75 Griffiths P R. Appl Spectrosc, 1977; 31: 284
76 Kizer K L et al. Am Lab, 1975; 5: 85
77 Vidrine D W. Fourier Transform Infared Spectroscopy: Applications to Chemical System. Vol 2, Academic Press, 1979
78 Jinno K et al. Am Lab, 1984; 2: 39
79 Johnson C C et al. Anal Chem, 1984; 56: 2642
80 黄威东，王俊德等. 光谱学与光谱分析，1991；6：11
81 Johnson C C et al. Anal Chem, 1985; 57: 610
82 Hellgeth J W et al. Anal Chem, 1987; 59: 295
83 Sabo M et al. Anal Chem, 1985; 57: 1822
84 Kuehl D et al. J Chromatogr Sci, 1979; 17: 471
85 Jinno K et al. Appl Spectrosc, 1982; 36: 37
86 Gagel J J et al. Anal Chem, 1986; 58: 2184
87 Conroy C M et al. Anal Chem, 1984; 56: 2636
88 Gagel J J et al. Anal Chem, 1987; 59: 1266
89 Fujimoto C et al. Anal Chim Acta, 1985; 178: 159
90 Castles M A et al. Appl Spectrosc, 1986; 40: 673
91 Kalasinsky K S et al. J Chromatogr Sci, 1987; 25: 273
92 Lange A J et al. Anal Chem, 1991; 63: 782
93 Robertson R M et al. Appl Spectrosc, 1988; 42: 1365

94 Percival C J et al. Anal Chem, 1975; 47: 154
95 Lloyd L B et al. Anal Chem, 1982; 54: 549
96 Shafer K H et al. Anal Chem , 1986; 58: 2708
97 林吟卿，张之皖等. 现代科学仪器，1994; 1: 15
98 Yamamoto H et al. Appl Spectrosc, 1991; 45; 253
99 Shafer K H, Griffiths P R. Anal Chem, 1983; 55: 1939
100 Shafer K H et al. HRC & CC, 1984; 7: 707
101 Norton K L et al. HRC & CC, 1991; 14: 225
102 Low M J D. Gas Effluent Analysis, Dekker, 1967
103 Lephardt J O. Appl Spectrosc Rev, 1982-83; 18: 265
104 Cody C. A et al. Am Lab 1981; 1: 93
105 Lephardt J O, Fenner R A. Appl. Spectrosc, 1980; 34: 174
106 Khorami J et al. Thermochim Acta, 1986; 103: 221
107 Carangelo R M et al. Am Lab, 1990; 22: 51
108 Rosencwaig A, Gersho A. J Appl, 1976; 47: 64

第十九章　化合物的特征红外频率和红外光谱图

第一节　化合物的特征红外频率

红外吸收光谱的研究已逾百年，在长期的发展过程中积累了大量的已知化合物的红外吸收光谱图以及各种官能团的特征频率资料，这是解析红外谱图和红外定性分析的基础。本节给出了一些小分子的基频振动频率，部分双原子分子和构成多原子分子和离子的双原子单元的伸缩振动频率，无机化合物的红外特征频率和有机化合物官能团的红外特征频率。

一、一些小分子的基频振动频率

表 19-1 给出了一些小分子的基频振动频率，包括三、四、五原子的稳定分子和不稳定的游离基，表中给出的数据一般来自气相红外和拉曼光谱，其中，有部分是来自液相或基体隔离光谱。分子按结构类型分类。表中：Linear—线形，Bent—弯曲形，Planar—平面形，Pyram—角锥形。数据单位为 cm^{-1}。

表 19-1　一些小分子的基频振动频率

XY_2 分子点群 $D_{\infty h}$（线形）和 C_{2v}（弯曲形）									
分子	结构	对称伸缩	弯曲	不对称伸缩	分子	结构	对称伸缩	弯曲	不对称伸缩
CO_2	Linear	1333	667	2349	NH_2	Bent	3219	1497	3301
CS_2	Linear	658	397	1535	NO_2	Bent	1318	750	1618
C_3	Linear	1224	63	2040	NF_2	Bent	1075	573	942
CNC	Linear	—	321	1453	ClO_2	Bent	945	445	1111
NCN	Linear	1197	423	1476	CH_2	Bent	—	963	—
BO_2	Linear	1056	447	1278	CD_2	Bent	—	752	—
BS_2	Linear	510	120	1015	CF_2	Bent	1225	667	1114
KrF_2	Linear	449	233	590	CCl_2	Bent	721	333	748
XeF_2	Linear	515	213	555	CBr_2	Bent	595	196	641
$XeCl_2$	Linear	316	—	481	SiH_2	Bent	2032	990	2022
H_2O	Bent	3657	1595	3756	SiD_2	Bent	1472	729	1468
D_2O	Bent	2671	1178	2788	SiF_2	Bent	855	345	870
F_2O	Bent	928	461	831	$SiCl_2$	Bent	515		505
Cl_2O	Bent	639	296	686	$SiBr_2$	Bent	403		400
O_3	Bent	1103	701	1042	GeH_2	Bent	1887	920	1864
H_2S	Bent	2615	1183	2626	$GeCl_2$	Bent	399	159	374
D_2S	Bent	1896	855	1999	SnF_2	Bent	593	197	571
SF_2	Bent	838	357	813	$SnCl_2$	Bent	352	120	334
SCl_2	Bent	525	208	535	$SnBr_2$	Bent	244	80	231
SO_2	Bent	1151	518	1362	PbF_2	Bent	531	165	507
H_2Se	Bent	2345	1034	2358	$PbCl_2$	Bent	314	99	299
D_2Se	Bent	1630	745	1696	ClF_2	Bent	500		576
XYZ 分子点群 $C_{\infty v}$（线形）和 C_s（弯曲）									
分子	结构	XY 伸缩	弯曲	YZ 伸缩	分子	结构	XY 伸缩	弯曲	YZ 伸缩
HCN	Linear	3311	712	2097	CCN	Linear	1060	230	1917
DCN	Linear	2630	569	1925	CCO	Linear	1063	379	1967
FCN	Linear	1077	451	2323	HCO	Bent	2485	1081	1868
ClCN	Linear	744	378	2216	HCC	Linear	3612		1848
BrCN	Linear	575	342	2198	OCS	Linear	2062	520	859
ICN	Linear	486	305	2188	NCO	Linear	1270	535	1921

续表

XYZ 分子点群 $C_{\infty v}$(线形)和 C_s(弯曲)

分　子	结构	XY 伸缩	弯曲	YZ 伸缩	分　子	结构	XY 伸缩	弯曲	YZ 伸缩
NNO	Linear	2224	589	1285	HOF	Bent	3537	886	1393
HNB	Linear	3675	—	2035	HOCl	Bent	3609	1242	725
HNC	Linear	3653	—	2032	HOO	Bent	3436	1392	1098
HNSi	Linear	3583	523	1198	FOO	Bent	579	376	1490
HBO	Linear	—	754	1817	ClOO	Bent	407	373	1443
FBO	Linear	—	500	2075	BrOO	Bent	—	—	1487
ClBO	Linear	676	404	1958	HSO	Bent	—	1063	1009
BrBO	Linear	535	374	1937	NSF	Bent	1372	366	640
FNO	Bent	766	520	1844	NSCl	Bent	1325	273	414
ClNO	Bent	596	332	1800	HCF	Bent	—	1407	1181
BrNO	Bent	542	266	1799	HCCl	Bent	—	1201	815
HNF	Bent	—	1419	1000	HSiF	Bent	1913	860	834
HNO	Bent	2684	1501	1565	HSiCl	Bent	—	808	522
HPO	Bent	2095	983	1179	HSiBr	Bent	1548	774	408

对称 XY_3 分子点群 D_{3h}(平面形)和 D_{3v}(角锥形)

分　子	结构	对称伸缩	对称变形	简并伸缩	简并伸缩	分　子	结构	对称伸缩	对称变形	简并伸缩	简并伸缩
NH_3	Pyram	3337	950	3444	1627	AsI_3	Pyram	219	94	224	71
ND_3	Pyram	2420	748	2564	1191	$AlCl_3$	Pyram	375	183	595	150
PH_3	Pyram	2323	992	2328	1118	SO_3	Planar	1065	498	1391	530
AsH_3	Pyram	2116	906	2123	1003	BF_3	Planar	888	691	1449	480
SbH_3	Pyram	1891	782	1894	831	BH_3	Planar	—	1125	2808	1640
NF_3	Pyram	1032	647	907	492	CH_3	Planar	—	606	3161	1396
PF_3	Pyram	892	487	860	344	CD_3	Planar	—	453	2369	1029
AsF_3	Pyram	741	337	702	262	CF_3	Pyram	1090	701	1260	510
PCl_3	Pyram	504	252	482	198	SiF_3	Pyram	830	427	937	290
PI_3	Pyram	303	111	325	79						

线形 XYYX 分子点群 $D_{\infty h}$

分　子	对称 XY 伸缩	不对称 XY 伸缩	YY 伸缩	弯曲	弯曲
C_2H_2	3374	3289	1974	612	730
C_2D_2	2701	2439	1762	505	537
C_2N_2	2330	2158	851	507	233

平面 X_2YZ 分子点群 C_{2v}

分　子	对称 XY 伸缩	YZ 伸缩	YX_2 剪式	不对称 XY 伸缩	YX_2 平面摇摆	YX_2 非平面摇摆
H_2CO	2783	1746	1500	2843	1249	1167
D_2CO	2056	1700	1106	2160	990	938
F_2CO	965	1928	584	1249	626	774
Cl_2CO	567	1827	285	849	440	580
O_2NF	1310	822	568	1792	560	742
O_2NCl	1286	793	370	1685	408	652

四面体 XY_4 分子点群 T_d

分　子	对称伸缩	简并变形 (e)	简并变形 (f)	简并变形 (f)	分　子	对称伸缩	简并变形 (e)	简并变形 (f)	简并变形 (f)
CH_4	2917	1534	3019	1306	GeH_4	2106	931	2114	819
CD_4	2109	1092	2259	996	GeD_4	1504	665	1522	596
CF_4	909	435	1281	632	$GeCl_4$	396	134	453	172
CCl_4	459	217	776	314	$SnCl_4$	366	104	403	134
CBr_4	267	122	672	182	$TiCl_4$	389	114	498	136
CI_4	178	90	555	125	$ZrCl_4$	377	98	418	113
SiH_4	2187	975	2191	914	$HfCl_4$	382	102	390	112
SiD_4	1558	700	1597	681	RuO_4	885	322	921	336
SiF_4	800	268	1032	389	OsO_4	965	333	960	329
$SiCl_4$	424	150	621	221					

二、部分双原子分子和构成多原子分子及离子的双原子单元的伸缩振动频率

表 19-2 给出了部分双原子分子和构成多原子分子和离子的双原子单元的伸缩振动频率，所列频率范围的高限是文献中给出的最大值，低限是文献中的最小值。有关详细情况可参阅表中所列的参考文献，表中双原子单元按字顺排列。

表 19-2　部分双原子分子和双原子单元的伸缩振动频率

双原子单元	实例	频率 σ/cm^{-1}	文献
AgC	Ag(Ⅰ)—C	390~360	1
AgO	Ag—O	645	3
AlBr	Al—Br	491~407	1
AlC	Al—C	690~508	2,12
AlCl	Al—Cl	625~484	1,3
	$[AlCl_4]^-$	580~349	1,2,3,11
AlF	Al—F	935	11
	$[AlF_4]^-$	599	2
AlH	Al—H	1832~1675	2,6
	$[AlH_4]^-$	1790~1740	1,7
AlI	Al—I	406~344	1
AlO	Al—O	699~499	3
AsAu	Au—As	268~265	3
AsBr	As—Br	284~275	1,3,11
AsCl	As—Cl	412~307	1,3,11
	$[AsCl_4]^+$	500~422	3,11
AsD	As—D	1534~1529	1,10,11
AsF	As—F	740~644	1,3,11
	$[AsF_6]^-$	706~682	3,6
AsH	As—H	2185~2122	1,9,10,11
	$[AsH_4]^+$	2174~2146	11
AsI	As—I	226~201	1,3,11
AsO	As—O	500	3
	As═O	880~840	10
	$[AsO_4]^{3-}$	878~800	1,6,11
AsPd	Pd—As	342~268	3
AsPt	Pt—As	334~242	3
AsS	As—S	480	6
	As═S	490~470	6
	$[AsS_4]^{3-}$	419~386	1
AsSe	As═Se	360~330	6
AsT	As—T	1258~1256	1,11
AuBr	Au(Ⅰ)—Br	233~210	2
	Au(Ⅲ)—Br	258	2
	$[AuBr_4]^-$	252~196	1,2,11
AuC	Au(Ⅰ)—C	532~427	1,2
	Au(Ⅲ)—C	541~477	2
AuCl	Au(Ⅰ)—Cl	329~311	2
	Au(Ⅲ)—Cl	362~342	2
	$[AuCl_2]^-$	340	2,3
	$[AuCl_4]^-$	356~324	1,2,3,11
AuI	Au(Ⅲ)—I	203	2
	$[AuI_4]^{2-}$	192~110	3,11
AuN	Au(Ⅲ)—N	306~234	3
AuO	Au—O	607	3
AuP	Au—P	424~348	3
BB	B—B	1162~680	12
BBr	B—Br	1080~240	1,6,11
	$[BBr_4]^-$	600~240	6,12
BC	B—C	1450~620	1,6,12
BCl	B—Cl	1090~290	1,6,11
	$[BCl_4]^-$	760~645	6,11,12
BD	B—D	1985~1837	1,10
	$[BD_4]^-$	1707~1570	1,11
BF	B—F	1505~840	1,6,7,10,11,12
	$[BF_4]^-$	1158~769	1,6,11,12
BH	B—H	2640~2267	1,6,10,11,12
	B—H…B	2140~1640	6,12
	$[BH_4]^-$	2400~2195	1,6,11,12
BI	B—I	740~190	1,11
BN	B—N	1550~1330	6,10,12
	B…N	780~680	6
	$[BN]^{-}$	1390~1390	6
BO	B—O	1470~1065	6,12
	$[BO_2]^-$	1350~1300	6
	$[BO_3]^{3-}$	1490~648	1,7,11
	$[B_4O_7]^{2-}$	1380~980	6
BP	B—P	869~550	4
	B═P	1497~1412	4
BS	B—S	955~905	6,12
BaO	Ba—O	503	3
BeBr	Be—Br	1010	3,11
BeCl	Be—Cl	1113	2,3,11
BeF	Be—F	1555~1520	2,3,11
BeI	Be—I	873	11
BiBr	Bi—Br	196~169	3,11
BiCl	Bi—Cl	288~242	2,3,11
BiI	Bi—I	145~115	3,11
BiO	Bi—O	645	3
BrBr	Br—Br	317	1,3
BrC	C—Br	757~267	1,5,6,8,11,12
BrCd	Cd(Ⅱ)—Br	315~122	2,3,11
	$[CdBr_3]^-$	184~168	11
	$[CdBr_4]^{2-}$	185~166	1,2,3
BrCl	Br—Cl	439	1,3
	$[BrCl_2]^-$	305~272	3,11
BrCo	CO(Ⅱ)—Br	396~232	2,3
	$[CoBr_4]^{2-}$	231	2,3
BrCu	Cu(Ⅰ)—Br	254	3
	$[CuBr_2]^-$	190	2,3
	$[CuBr_4]^{2-}$	216~174	2,3
BrD	D—Br	1840	10
BrF	F—Br	690~528	1,3
	$[BrF_4]^-$	542~449	11
BrFe	Fe(Ⅱ)—Br	203	3
	$[FeBr_4]^-$	289	2,3
	$[FeBr_4]^{2-}$	219	2,3
BrGa	Ga(Ⅲ)—Br	290~223	3

续表

双原子单元	实例	频率 σ/cm⁻¹	文献
	$[GaBr_4]^-$	288～209	1,2,3,11
BrGe	Ge—Br	328～234	1,2,3,11
BrH	H—Br	2558	1,9,10
BrHf	Hf—Br	255～211	11
	$[HfBr_6]^{2-}$	201～193	3
BrHg	Hg(Ⅱ)—Br	293～209	1,2,3,11
	$[HgBr_3]^-$	179	2,3
	$[HgBr_4]^{2-}$	170～166	2,3
BrI	Br—I	267	1,3
	$[BrI_2]^-$	168～117	3,11
	$[IBr_2]^-$	180～143	11
BrIn	$[InBr_4]^-$	239～197	1,2,3,11
BrMg	Mg—Br	490	3
BrMn	Mn(Ⅱ)—Br	248～198	3
	$[MnBr_4]^{2-}$	221	2,3
BrMo	Mo—Br	255～244	3
BrN	N—Br	687	11
BrNb	Nb—Br	241	3
BrNi	Ni(Ⅱ)—Br	415～227	3
	Ni(Ⅳ)—Br	340	2
	$[NiBr_4]^-$	231～224	2,3
BrO	$[BrO_2]^-$	750～630	3,11
	$[BrO_3]^-$	849～762	1,6,11
	$[BrO_4]^-$	878～801	11
BrP	P—Br	495～299	1,3,4,6,8,11
	$[PBr_4]^+$	474～227	11
BrPd	Pd(Ⅳ)—Br	208～178	3
	$[PdBr_4]^2$	260～165	3,11
BrPt	Pt(Ⅱ)—Br	242～230	3
	Pt(Ⅳ)—Br	259～180	2,3
	$[PtBr_4]^{2-}$	232～190	3
	$[PtBr_6]^{2-}$	244～207	1,2,3
BrRe	Re—Br	195	1,3
	$[ReBr_6]^{2-}$	217～213	2,3
BrS	S—Br	531～302	1,11
BrSb	Sb—Br	254～205	1,3,11
BrSe	Se—Br	292～204	1,11
	$[SeBr_6]^2$	222～215	3
BrSi	Si—Br	487～249	1,6,7,11,12
BrSn	Sn(Ⅳ)—Br	315～220	1,2,3,11
	$[SnBr_3]^-$	211～181	1,2,3,11
	$[SnBr_6]^{2-}$	185～138	1,2,3
BrTe	Te—Br	1519	1,10
BrTe	Te—Br	250～222	3,11
	$[TeBr_6]^{2-}$	198～166	3
BrTi	Ti—Br	412～229	1,2,3,11
BrTi	$[TiBr_6]^2$	256～192	3
BrTl	$[TlBr_4]^-$	209～190	1,2,3,11
BrV	V—Br	400～271	1,3
BrW	W—Br	403～220	3
	$[WBr_6]^{2-}$	229～214	3
BrZn	Zn(Ⅱ)—Br	404～205	3,11
	$[ZnBr_3]^-$	182	11
	$[ZnBr_4]^{2-}$	210～172	1,2,3
	$[ZnBr_6]^{2-}$	376～198	3,12
CC	C—C	1210～837	5,6,12
	C=C	1938～1390	2,6,8,9,10,12
	C=C=C	2022～1915	5,6,8,9,10,12
	C=C=O	2197～2049	5,12

双原子单元	实例	频率 σ/cm⁻¹	文献
	C≡C	2310～1961	2,5,6,8,12
CCd	Cd(Ⅱ)—C	538～316	1,2
CCl	C—Cl	890～459	1,5,6,8,10,11,12
CCo	Co(Ⅲ)—C	532～357	1,2
CCr	Cr(Ⅲ)—C	457～330	1,2
CCu	Cu(Ⅰ)—C	365～288	1,2
CD	—C—D	2259～2083	1,7,10,11
	=C—D	2337～2225	10,12
	≡C—D	2630～2585	1,7,10,11
CF	C—F	1450～904	1,6,7,8,11,12
CFe	Fe(Ⅱ)—C	550～364	1,2
CGa	Ga—C	620～535	2,6
CGe	Ge—C	645～510	6
CH	—C—H	3101～2760	1,5,6,7,8,9,10,11,12
	=C—H	3158～2981	5,6,8,9,12
	≡C—H	3340～3288	1,5,6,7,8,11,12
CHg	Hg(Ⅱ)—C	577～330	1,2
CI	C—I	602～178	1,5,6,8,10,11,12
CIn	In—C	570～465	2,6
CIr	Ir(Ⅲ)—C	463～401	2
CLi	Li—C	528～508	10
CMn	Mn(Ⅱ)—C	433～405	2
CMo	Mo—C	401～368	1,2
CN	C—N	1433～1020	4,5,8,12
	=C—N	1490～1050	6
	C=N	1690～1480	6,8,9,10,12
	N=C=S	2199～1934	5,9,12
	N=C=N	2260～2125	5
	N=C=O	2304～2250	5,9
	—C≡N	2305～2094	5,6,7,8,9,10,12
	—N≡C	2183～2115	5,6,9
	$[CN]^-$	2239～1985	1,6,8,11
	$[OCN]^-$	2200～2000	6,8
	$[SCN]^-$	2200～2000	6,8,10
CNi	Ni(Ⅱ)—C	543～381	1,2,10
CO	C—O	1300～895	5,6,8,12
	C=O	1928～1550	1,3,6,8,9,10,12
	O=C=O	2349	1,3
	O=C=S	2062	11
	O=C=Se	2021	11
	$[COO]^-$	1690～1300	1,5,6,9,10,12
	$[CO_3]^{2-}$	1580～1053	1,6,8,11
	$[HCO_3]^-$	1420～1290	6
	C≡O	2143～1788	1,8,10
COs	Os(Ⅱ)—C	465	2
CP	—C—P	910～409	4,6,12
	=C—P	1450～1425	4
	P≡C	1570～900	4
CPb	Pb—C	480～420	2,6
CPd	Pd(Ⅱ)—C	534～435	2
CPt	Pt(Ⅱ)—C	576～455	1,2
CRh	Rh(Ⅲ)—C	445	2
CRu	Ru(Ⅳ)—C	425	2
CS	C—S	1035～245	5,6,8,12
	=C—S	1030～670	6
	≡C—S	650～600	6
	C=S	1570～843	1,5,6,8,9,12
	S=C=S	1532	11
	S=C=Se	1435	11

续表

双原子单元	实例	频率 σ/cm⁻¹	文献
	S—C—Te	1347	11
	$[CS_3]^{2-}$	1010～505	11
CSb	C—Sb	600～475	6
CSe	≡C—Se	545～520	6
	C—Se	750～505	6
	C═Se	1303～800	1,6,9
	Se═C═Se	1303	11
	$[CSe_3]^{2-}$	802～316	11
CSi	Si—C	900～305	6,8,12
CSn	C—Sn	610～450	2,6
CT	—C—T	1937～1796	10
	≡C—T	2460	1,7,11
CW	W—C	432～431	1,2
CZn	Zn(Ⅱ)—C	615～342	1,2
CaF	Ca—F	595～520	3
CaO	Ca—O	400	3
CdCd	Cd—Cd	183	3
CdCl	Cd(Ⅱ)—Cl	427～199	2,3,11
	$[CdCl_3]^-$	287～265	11
	$[CdCl_4]^{2-}$	260	2,3
CdCo	Cd—Co	161	3
CdFe	Cd—Fe	266～216	3
CdI	Cd(Ⅱ)—I	265～88	2,3,11
	$[CdI_3]^-$	161～124	11
	$[CdI_4]^{2-}$	145～117	1,2,3
CdN	Cd(Ⅱ)—N	381～277	1,2,3
CdO	Cd(Ⅱ)—O	199	3
CeCl	$[CeCl_6]^{2-}$	295～265	3
CeN	Ce—N	553	3
CeO	Ce—O	525	3
ClCl	Cl—Cl	557	1,3
ClCo	Co(Ⅱ)—Cl	493～279	2,3
	$[CoCl_4]^{2-}$	297	2,3
ClCr	Cr—Cl	497～319	1,2,3
	$[CrCl_6]^{3-}$	315	3
ClCu	Cu(Ⅱ)—Cl	496～294	2,3
	$[CuCl_2]^-$	296	2,3
	$[CuCl_4]^{2-}$	267	2
ClD	D—Cl	2091	1,10
ClF	F—Cl	774～528	1,3
	$[ClF_2]^-$	661～470	11
	$[ClF_4]^-$	680～417	11
ClFe	Fe(Ⅱ)—Cl	499～268	2,3
	$[FeCl_4]^-$	385～330	1,2,3,11
	$[FeCl_4]^{2-}$	286	2,3
	$[FeCl_6]^{3-}$	248～227	3
ClGa	Ga(Ⅲ)—Cl	418～334	3
	$[GaCl_4]^-$	453～346	1,2,3,11
ClGe	Ge—Cl	453～355	1,2,3,7,11
	$[GeCl_3]^-$	320～253	1,2,3,11
	$[GeCl_5]^-$	348～319	3
	$[GeCl_6]^{2-}$	312～293	2,3
ClH	H—Cl	2886	1,9,10
ClHf	Hf—Cl	393～347	3,11
	$[HfCl_6]^{2-}$	333～273	3
ClHg	Hg(Ⅱ)—Cl	413～292	1,2,3,11
	$[HgCl_3]^-$	294～245	2,3,11
	$[HgCl_4]^{2-}$	276～228	2
ClI	Cl—I	381	1,3
	$[ICl_2]^-$	282～218	3,11
	$[ICl_4]^-$	288	1
ClIn	$[InCl_4]^-$	337～321	1,2,3,11
	$[InCl_5]^{2-}$	295～267	2,3
	$[InCl_6]^{3-}$	275～248	2,3
ClIr	Ir(Ⅲ)—Cl	322	2
	$[IrCl_6]^{2-}$	333～316	2,3
	$[IrCl_6]^{3-}$	300～290	2,3
ClMg	Mg(Ⅱ)—Cl	597	2,3,11
ClMn	Mn(Ⅱ)—Cl	477～227	2,3
	$[MnCl_4]^{2-}$	284	3
	$[MnCl_6]^{3-}$	342	3
ClMo	Mo—Cl	401～299	2,3
	$[MoCl_6]^{2-}$	340～325	3
ClN	Cl—N	803～536	11,12
ClNb	Nb—Cl	500～319	1,2,3
	$[NbCl_6]^-$	336～333	2,3
ClNi	Ni(Ⅱ)—Cl	521～224	2,3,11
	Ni(Ⅳ)—Cl	408～403	2,3
	$[NiCl_4]^{2-}$	289	3
ClO	Cl—O	1111～688	1,7,10,11
	$[ClO_2]^-$	860～786	11
	$[ClO_3]^-$	1028～892	1,6,11
	$[ClO_4]^-$	1170～928	1,3,6,11
ClOs	Os—Cl	325～288	2,3
	$[OsCl_6]^{2-}$	346～240	2,3
ClP	P—Cl	607～393	1,3,4,6,7,8,10,11
	$[PCl_4]^+$	658～458	3
	$[PCl_6]^-$	449～360	3
ClPa	Pa—Cl	396～324	3
	$[PaCl_6]^-$	310～305	2,3
	$[PaCl_8]^{3-}$	290	3
ClPb	Pb(Ⅱ)—Cl	352～300	11
	pb(Ⅳ)—Cl	348～327	1,2,3
	$[PbCl_3]^-$	288～218	3,11
	$[PbCl_6]$	285～265	2,3
ClPd	Pd(Ⅱ)—Cl	351～288	2,3
	Pd(Ⅳ)—Cl	362～306	2
	$[PdCl_4]^{2-}$	336～275	3,11
	$[PdCl_6]^{2-}$	358～317	1,2,3
ClPt	Pt(Ⅱ)—Cl	322～298	2,3
	Pt(Ⅳ)—Cl	344～302	2
	$[PtCl_4]^{2-}$	335～306	1,2,3,11
	$[PtCl_6]^{2-}$	345～330	1,2,3
ClRe	Re—Cl	293～279	1,3
	$[ReCl_6]^{2-}$	346～300	2,3
ClRu	Ru(Ⅱ)—Cl	340～316	3
	$[RuCl_6]^{2-}$	346～332	3
ClS	S—Cl	541～362	1,3,11
	$[SCl_3]^+$	543～519	3
ClSb	Sb—Cl	399～307	1,3,11
	$[SbCl_4]^+$	399～353	3,11
	$[SbCl_6]^-$	337～277	1,3
ClSe	Se—Cl	590～288	1,3,11
	$[SeCl_3]^+$	437～390	3
	$[SeCl_6]^{2-}$	346～273	1,3
ClSi	Si—Cl	650～370	1,6,7,8,12
ClSn	Sn(Ⅳ)—Cl	558～367	1,2,3,11
	$[SnCl_3]^-$	297～256	1,2,3,11

续表

双原子单元	实例	频率 σ/cm⁻¹	文献	双原子单元	实例	频率 σ/cm⁻¹	文献
	$[SnCl_5]^-$	331～326	3		$[ND_4]^+$	2350～2035	1,7,11
	$[SnCl_6]^{2-}$	318～295	1,2,3	DO	O—D	2788～1970	1,4,6,10
ClT	T—Cl	1739～1375	1,10		$[OD]^-$	2681	1
ClTa	Ta—Cl	490～402	3	DOs	Os—D	1509～1505	2
	$[TaCl_6]^-$	330～319	2,3	DP	P—D	1795～1650	1,4,6,10,11
ClTc	Tc—Cl	343～304	3		$[PD_4]^+$	1740～1625	1,10,11
ClTe	Te—Cl	376～342	3,11	DPt	Pt—D	1610～1504	2
	$[TeCl_3]^+$	412～385	3	DRe	Re—D	1458～1318	2
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

续表

双原子单元	实例	频率 σ/cm^{-1}	文献
	$[PtF_6]^{2-}$	600～571	2,3
FPu	Pu—F	628～522	1,2,3,7
FRe	Re—F	755～596	1,2,3,7
	[Re—F]	755～596	1,2,3,7
	$[ReF]^{-}$	627	2
	$[ReF]^{2-}$	541	2
	$[ReF_7]^{2-}$	598	3
FRh	Rh—F	724～634	2,3
FRu	Ru—F	735～675	2,3
	$[RuF]^{-}$	640	2
	$[RuF]^{2-}$	581	2
FS	S—F	932～644	1,3,6,7,11
FSb	Sb—F	716～264	1,3
FSe	Se—F	780～662	1,3,7,11
FSi	Si—F	1031～800	1,6,7,8,11,12
	$[SiF_6]^{2-}$	725～655	1,3,6
FSn	Sn—F	532～490	2,3
	$[SnF_6]^{2-}$	593～556	2,3
	$[SnF_3]^{-}$	458～382	3
FSr	Sr—F	490～485	3
FT	T—F	2444	1
FTa	Ta—F	550～513	2,3
	$[TaF_6]^{-}$	692～560	3
	$[TaF_7]^{2-}$	526～518	3
FTc	Tc—F	705～551	1,2,3
FTe	Te—F	752～674	1,2,3,7,11
FTh	Th—F	520	2,3
FTi	Ti—F	600～521	2,3
	$[TiF_6]^{2-}$	613～560	3
FU	U—F	668～532	1,2,3,7,11
	$[UF_6]^{-}$	506～503	3
FV	V—F	805～557	2,3
FW	W—F	772～480	1,2,3,7,11
	$[WF_7]^{2-}$	620	3
FXe	Xe—F	586～502	3,11
FZn	Zn(Ⅱ)—F	758～750	11
FZr	Zr(Ⅳ)—F	725～600	1,2,3
	$[ZrF_6]^{2-}$	581	3
FeH	Fe—H	1872～1726	2
FeHg	He—Fg	219～196	3
FeI	$[FeI_4]^{2-}$	186	2,3
FeN	Fe(Ⅱ)—N	445～294	2,3
FeO	Fe—O	570～438	3
	$[FeO_4]^{2-}$	870～790	1,2,3,11
FeSn	Fe—Sn	235～174	3
GaH	Ga—H	1853～1823	2
GaI	Ga—I	264～150	3
	$[GaI_4]^{-}$	222～145	3,11
GaO	Ga—O	663	3
GaP	Ga—P	370～320	4
GdN	Gd—N	249～235	3
GdO	Gd—O	535～241	3
GeGe	Ge—Ge	273	3
GeH	Ge—H	2160～1990	1,6,7,9,10,11
GeI	Ge—I	264～159	1,2,11
GeMo	Ge—Mo	184～178	3
GeN	Ge—N	672～551	2
GeO	Ge—O	900～585	3,6
	$[GeO_4]^{3-}$	808～700	11
GeP	Ge—P	402～297	4
GeSn	Ge—Sn	235～225	3
GeW	Ge—W	177～169	3
HH	H—H	4161	1
HI	H—I	2230	1,9
HIr	Ir—H	2245～1745	2
HMn	Mn—H	1782	2
HMo	Mo—H	1905～1790	2
HN	N—H	3555～3300	1,5,6,7,8,9,10,12
	N—H···	3400～3049	3,4,5,6,8,12
	$[NH]^{+}$	3380～1800	6,8,12
	$[NH_4]^{+}$	3335～3030	1,6,7,8,11,12
HO	O—H	3756～3500	1,5,6,8,9,10,11,12
	O—H···	3600～2200	1,4,5,6,8,12
	$[OH]^{-}$	3698～3563	1
HOs	Os—H	2105～1720	2
HP	P—H	2540～2265	1,4,6,7,8,10,11,12
	$[PH_4]^{+}$	2370～2304	1,7
HPt	Pt—H	2200～1670	2,6
HRe	ReH	2070～1832	2,6
HRh	Rh—H	2140～1969	2
HRu	Ru—H	2020～1615	2
HS	S—H	2627～2400	1,5,6,8,9,11,12
HSb	Sb—H	1894～1891	1,7,9,10,11
HSe	Se—H	2360～2260	1,6,9,11,12
HSi	Si—H	2315～2050	1,6,7,8,9,10,11
HSn	Sn—H	1910～1800	1,2,6,9,11
HTa	Ta—H	1735	2
HW	W—H	1943～1828	2
HfI	Hf—I	185～142	11
HfO	Hf—O	755～567	3
HgHg	Hg—Hg	169～113	3
HgI	Hg(Ⅰ)—I	237～111	2,3,11
	$[HgI_3]^{-}$	125	2,3
	$[HgI_4]$	126～117	2,3
HgN	Hg(Ⅰ)—N	573～408	1,2
HgO	Hg—O	588～573	3
HoN	Ho—N	256～246	3
HoO	Ho—O	265	3
	Ho═O	559	3
II	I—I	213	1,3
IIn	$[InI_4]^{-}$	185～139	1,2,3,11
IMn	$[MnI_4]^{2-}$	185	2,3
INi	Ni(Ⅳ)—I	280	2
	$[NiI_4]^{2-}$	189	2,3
IO	$[IO_3]^{-}$	827～650	1,6,11
	$[IO_4]^{-}$	853～791	1,11
IP	P—I	350～290	1,4,11
IPt	$[PtI_4]^{2-}$	180～126	3,11
	$[PtI_6]^{2-}$	186	3
ISb	Sb—I	177～146	3,11
ISe	SeI_6^{2-}	142	3
ISi	Si—I	405～168	1,6,11
ISn	Sn(Ⅳ)—I	219～149	1,2,3,11
	$[SnI_6]$	165	3
ITe	Te—I	172～140	3,11
	$[TeI_6]^{2-}$	160～142	3
ITl	Tl—I	176～136	3
IZn	Zn(Ⅱ)—I	346～337	3,11

续表

双原子单元	实例	频率 σ/cm^{-1}	文献
	$[ZnI_4]^{2-}$	170～122	1,2,3
InN	In—N	257～232	3
IrN	Ir—N	527～390	2,3
IrSn	SnIr	165	3
LaN	La—N	218～215	3
LaO	La—O	644	3
LuN	Lu—N	263～248	3
LuO	Lu—O	570～226	3
MgO	Mg—O	445	3
MnN	Mn(Ⅱ)—N	343～295	2.3
MnO	Mn(Ⅱ)—O	418～231	3
	Mn(Ⅱ)═O	615～600	3
	$[MnO_4]^-$	940～838	1,3,6,11
MnSn	Mn—Sn	201～170	3
MoMo	Mo—Mo	260～210	3
MoN	Mo—N	552	2
MoO	Mo═O	971～660	3
	Mo═O	950～938	2
	$[MoO_4]^2$	936～805	1,2,3,6,11
MoS	Mo—S	402～380	3
	$[MoS_4]^{2-}$	480～460	11
MoSn	Mo—Sn	190～166	3
NN	N—N	1111～873	3,5,6,12
	N═N	1630～1380	5,6,8,9,10
	N═N═N	2144～2080	6,9,12
	N≡N	2331～2202	1,6,10
	$[N_3]^-$	2189～2008	1,6,11
NNa	Na—N	435	2
NNd	Nd—N	218～217	3
NNi	Ni(Ⅱ)—N	614～286	3
	Ni(Ⅲ)—N	412～334	1,2
NO	N—O	1380～810	1,3,5,6,8,9,10,11,12
	N═O	1876～1205	1,2,3,5,6,8,9,10,11,12
	$[NO_2]^-$	1468～1048	1,3,6,8,11,12
	$[NO_3]^-$	1420～1018	1,6,8,11,12
	$[NO]^+$	2370～1575	1,6
	$[NO_2]^+$	2360	1
NOs	Os—N	482～410	2,3
	Os═N	917～867	2
	Os≡N	1098～1021	2
NP	P—N	1055～605	4,8
	P═N	1500～1055	4,6
NPd	Pd(Ⅱ)—N	500～261	1,2,3
NPt	Pt(Ⅱ)—N	603～298	1,2,3
	Pt(Ⅳ)—N	526～394	2,3
NRh	Rh—N	524～362	2,3
NRu	Ru—N	500～417	3
NS	N—S	1070～831	6,10
NSe	N—Se	590～540	6
NSi	Si—N	1235～570	2,3,6,12
NSm	Sm—N	249～216	3
NSn	Sn—N	556～250	2,3
NT	N—T	2163～2016	1,3,11
	$[NT_4]^+$	2022～1889	1,7,11
NTh	Th—N	527	3
NTi	Ti—N	565～532	2,3
NTl	Tl—N	294～280	3
NTm	Tm—N	287～248	3
NU	U—N	590～582	3
NV	V—N	560～556	2
NW	W≡N	1084～1068	2
NY	Y—N	281～214	3
NZn	Zn(Ⅱ)—N	437～224	1,2,3
NbO	Nb—O	575～478	3
	$[NbO_3]^-$	675～510	7
	$[NbO_8]^{3-}$	814	11
	Nb═O	943～884	2
NdO	Nd—O	655	3
	Nd—O	237	3
NiO	Ni(Ⅰ)—O	650～444	3
	Ni(Ⅱ)—O	458～397	1
NiP	Ni—P	426～343	3
NiS	Ni—S	435～408	3
OO	O—O	1000～771	1,2,3,5,6,8,11,12
	O═O	1555	1
OOs	Os—O	527～492	2
	Os═O	971～954	1,2
	$[OsO_4]^{2-}$	350～300	6
OP	P—O	1070～900	4,6,8
	P═O	1415～1080	1,4,6,7,8,9,10
	$[PO_2]^-$	1323～995	4,6,8
	$[PO_3]^{2-}$	1242～893	4,6,8
	$[PO_3]^-$	1240～1050	4,6
	$[HPO_4]^{2-}$	1100～1000	4,6,8
	$[H_2PO_4]^-$	1100～1020	6,8
	$[PO_4]^{3-}$	1180～938	1,3,4,6,8,11
OPb	Pb═O	650～500	3,6
OPr	Pr(Ⅲ)—O	237	3
	Pr═O	655	3
ORe	Re═O	1028～960	1,2
	$[ReO_4]^-$	973～874	1,2,3,11
ORu	Ru═O	920～913	1,2
	$[RuO_4]^-$	848～826	2,3,11
	$[RuO_4]^{2-}$	856～790	2,11
OS	S—O	910～734	6,12
	S═O	1510～980	1,5,6,7,8,9,10,11,12
	$[SO_3]^{2-}$	1010～910	1,6,11
	$[SO_4]^{2-}$	1200～971	1,3,6,8,11,12
	$[HSO_4]^-$	1190～1000	6
	$[S_2O_3]^{2-}$	1120～1100	6
	$[S_2O_5]^{2-}$	1190～1170	6
	$[S_2O_8]^{2-}$	1300～1250	6
OSb	Sb—O	740	3
OSc	Sc—O	625	3
OSe	Se—O	1040～500	6
	Se═O	1005～800	6,11
	$[SeO_3]^{2-}$	807～710	1,6,11
	$[SeO_4]^{2-}$	875～750	1,3,6,11
OSi	Si—O	1100～775	3,4,6,8,12
	$[SiO_3]^{2-}$	1030～960	6
	$[SiO_4]^{2-}$	1050～800	1
	$[SiO_4]^{3-}$	1001～819	11
OSm	Sm—O	237	3
	Sm═O	640	3
OSn	Sn—O	780～302	2,3,6,11
OSr	Sr—O	590	3
OT	O—T	2370	1
OTa	Ta—O	612～540	3

续表

双原子单元	实例	频率 σ/cm^{-1}	文献	双原子单元	实例	频率 σ/cm^{-1}	文献
	$[TaO_3]^{3-}$	814	11		$[PS_4]^{3-}$	560～413	11
OTb	Tb—O	244	3	PSe	P═Se	599～421	4,9
OTc	$[TcO_4]^-$	912	2,11		$[PSe_2]^-$	610～449	4
OTe	$[TeO_3]^{2-}$	758～703	1	PSi	P—Si	515～380	4,12
OTh	Th═O	645	3	PSn	P—Sn	529～284	4
OTi	Ti═O	1087～695	2,3	PT	P—T	1401～1398	1,11
	Ti(Ⅳ)—O	625～310	3,11	PTe	P—Te	518～400	4
	$[TiO_3]^2$	610～495	7	PdPd	Pd—Pd	195～179	3
OTm	Tm—O	565～266	3	PdS	Pd—S	401	3
OU	$[UO_2]^{2+}$	996～824	1,2,6,11	PdSe	Pd—Se	270～193	3
	$[UO_4]^{2-}$	775～705	11	PtPt	Pt—Pt	195～180	3
	$[U_2O_7]^{2-}$	768～754	11	PtS	Pt—S	405～310	3
OV	V(Ⅳ)—O	595～450	1,2,3	PtSe	Pt—Se	295～214	3
	V═O	1035～890	1,2,7	PtSn	Pt—Sn	210～193	3
	$[VO_2]^+$	1030～875	11	ReRe	Re—Re	120	3
	$[VO_3]^-$	960～920	6	ReS	Re—S	373～338	3
	$[VO_4]^{3-}$	874～825	1,2,11	RhSn	Rh—Sn	217～209	3
	$[VO_8]^{3-}$	846	11		Rh—Sn	165	3
OW	W—O	355	3	SS	S—S	543～354	1,5,6,7,11,12
	W═O	976～954	2		S—S	719	11
	$[WO_4]^{2-}$	931～780	1,2,3,6,11	SSb	$[SbS_4]^{3-}$	380～366	1
OXe	Xe═O	928～820	3	SSi	Si—S	515～441	12
OY	Y—O	561	3	STe	Te—S	264～229	3
OYb	Yb—O	240	3	SV	V—S	406～385	3
	Yb═O	569	3		$[VS_4]^{2-}$	470～404	11
OZn	Zn—O	431～336	3	SW	W—S	403～369	3
OZr	Zr—O	745～559	3		$[WS_4]^{2-}$	485～450	11
	Zr(Ⅳ)—O	335～250	11	SbT	Sb—T	1125	11
PP	P—P	510～340	4	SeSe	Se—Se	367～265	1,11
PPd	Pd—P	444～341	3	SiSi	Si—Si	404	3
PPt	Pt—P	428～346	3	SnSn	$Sn—Sn^-$	208～190	3
PS	P—S	613～440	4	SnW	Sn—W	166～158	3
	P═S	847～600	1,4,5,9	WW	W—W	150	3
	$[PS_3]^-$	742～476	4				

本表参考文献：

1 Nakamoto K. Infraed Spectro of Inorganic and Coordination Compounds, New York: Wiley, 1963; Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. 4th edition, New York: Wiley Interscience, 1986

2 Adams D M. Metal-Ligand and Related Vibrations, London: Edward Arnold, 1967

3 Ferraro J R. Low-frequency Vibrations of Inorganic and Coordinations Compounds, New York: Plenum Press, 1971

4 Thomas L C. Interpretation of the Infrared Spectra of Organophosphorus Compounds, London: Heyden, 1974

5 Dollish F R, et al. Characteristic Raman Frequencies of Organic Compounds, New York: Wiley, 1974

6 Socrates G. Infrared Characteristic Group Frequencies, New York: Wiley, 1980

7 Lawson K E. Infrared Absorption of Inorganic Substancies, New York: Rheinhold, 1961

8 Bellamy L J, The Infrared Spectra of Complex Molecules Ⅰ, London: Chapman and Hall, 1975

9 Bellamy L J. The Infrared Spectra of Complex Molecules Ⅱ, London: Chapman and Hall, 1980

10 Pinchas S, et al. Infrared Spectra of Labelled Compounds. London: Academic Press, 1971

11 Ross S D. Inorganic Infrared and Raman Spectra, London: McGraw-Hill, 1972

12 Miller R G J, et al. IRSCOT: Infrared structural Correlation Tables, London: Heyden, 1969

三、无机化合物的红外特征频率

无机化合物在红外光谱中通常只显示分子中阴离子信息，金属离子对其特征频率影响较小。

表 19-3 给出了部分无机阴离子的红外特征频率，表中缩写符号的含义：(O) ——通常；(OWK) ——通常是弱的，并不总能检出；(D) ——双峰；(SD) ——有时为双峰；(OD) ——

通常是双峰；(M) ——多重峰；(SM) ——有时为多重峰；(SMAX) ——次强；(stg) ——强；(m) ——中；(wk) ——弱；OM——通常是多重峰；Om——通常是中等强度的峰。

表 19-4 给出了部分无机阴离子的基频振动，括号中的符号是其振动类型。

表 19-3 无机化合物特征吸收谱带

元素	离子	特征吸收谱带
铝	AlH_4^-	≈1785 stg,≈1645 m,≈710 m
	AlO_2^-	800~920 m,620~670 wk,515~560 wk,450~480 wk,370~380 wk
砷	AsO_2^-	450~860(M)
	AsO_3^{2-}	700~840 stg
	$As_2O_7^{4-}$	750~880 stg(M),≈540 m,≈400 stg
	$HAsO_4^{2-}$	≈840 stg,720~740 m,≈400
	AsO_4^{3-}	770~850 stg(OM 或 SMAX)
锑	SbO_3^-	≈700,≈635,≈560,≈490
硼		60~100
	$B_2O_7^{2-}$	1340~1480 stg(SMAX),1100~1150 wk(OD),1000~1050 wk(OD),900~950 w,≈825 wk,520~545 wk,500~505 wk,450~470 wk
碳	CN^-	2130~2230 stg(SD)
	$Fe(CN)_6^{3-}$	—2140 and ≈395
	$Fe(CN)_5NO^{2-}$	2130~2170 wk-m(m),≈1929 stg
	$Fe(CN)_8^{4-}$	2020~2130 stg(SM),580~610 wk,410~500 wk
	OCN^-	2180~2250 stg,590~630 m
	SCN^-	2040~2160 stg,420~490(OD)
	CN_2^{2-}	≈2000 stg,≈1935 stg,≈1300,≈1215,≈640,≈630
	HCO_3^-	2000~3300(SMAX),1840~1930 wk,1600~1700 stg(SMAX),940~1000 m,830~840 m,690~710 m,640~670 wk
	CO_3^{2-}	1320~1530 stg(OD),1040~1100 wk(OD),800~890 wk-m,670~745(owk 或 WD)
	CS_3^{2-}	≈931 stg,≈910 stg,≈518 wk
铬	$Cr_2O_4^{2-}$	≈620~720 stg,515~550 m stg
	$Cr_2O_7^{2-}$	880~990 stg,(om,1 or 2 wk,880~920),720~840 stg,(555~580 o wk),340~380 wk
	CrO_4^{2-}	850~930 stg(OM 或 SMAX 800~980)
钴	CoO_2^-	≈660 m,≈570 stg
卤素	F^-	
	HF_2^-	2050~2122 m,≈1600 stg,1200~1235 m stg
	BF_4^-	1000~1100(最大值近于 1050)stg,(owk 760~780),510~560 wk(O 或 M)
	AlF_6^{3-}	550~650 stg,380~410
	GaF_6^{3-}	≈475 m
	SiF_6^{2-}	700~760 stg,460~530 wk-m(o M)
	GeF_6^{2-}	590~620 stg,320~380 m-stg(OD)
	SnF_3^-	450~490,340~450
	SnF_6^{2-}	540~610 stg,200~280(1 或更多)
	PF_6^-	820~860 stg,550~565 m
	AsF_6^-	≈695 stg,390 m
	SbF_6^-	650~670 stg,280~300
	TiF_6^{2-}	540~600 stg,200~350(2 或更多)
	FeF_6^{3-}	460~510 stg,280~300 m
	ZrF_5^-	450~500 stg,≈300
	ZrF_6^{2-}	440~500 stg,270~320m
	Cl^-	
	$SnCl_6^{2-}$	300~325 stg
	$FeCl_5^{2-}$	440~460 m,340~380 m,250~300 stg,170~195 m
	$CuCl_4^{2-}\cdot 2H_2O$	530~570 wk-m,310~320 m,255~275 wk,100~110 wk,95~100 wk,58~65 wk
	$MoCl_6^{3-}$	≈305 stg
	$PdCl_4^{2-}$	300~350 stg(M),160~220 m-stg
	$PdCl_6^{2-}$	≈360 stg
	$PtCl_4^{2-}$	315~325 stg,190~220 m-stg,110~130 m
	ClO_2^-	800~850 stg(D)
	ClO_3^-	900~1050 stg(D 或 M),610~630 m sp,475~525 m(OD)
	ClO_4^-	1050~1150 stg(O SMAX),600~660 wk-m(OD)
	Br^-	
	BrO_3^-	740~850 stg(OD 或 SMAX),390~450 wk-m,(OD),350~380 m

续表

元素	离子	特征吸收谱带
	I^-	
	IO_3^-	690~830 stg(O SMAX 或 M),300~420(OD 或 M)
	IO_4^-	830~860 stg,310~330 m,260~270 wk-m
铁	$Fe_2O_4^{2-}$	550~610 stg,400~450 m
氮	N_3^-	3150~3400 wk-m(OD),2025~2150 stg,620~660 wk-m(OD 或 M)
	NO_2^-	1170~1350 stg(OD),820~850 wk(OD 或 M)
	NO_3^-	1730~1810 wk(SM),1280~1520 stg(OD 或 M),1020~1060(owk),800~850(W-M),715~770 wk-m(OD)
	$Ce(NO_3)_6$	1465~1550 stg,1275~1300 stg,1030~1045 m,800~820 m,740~750 m
锰	MnO_3^{2-}	≈635 m,≈550 stg
	MnO_4^{2-}	800~900 stg(M)
	MnO_4^-	870~950 stg(O M 或 SMAX),(o wk 830~840),370~400 wk(OD)
钼	MoO_4^{2-}	750~835 stg(OM 或 SMAX 740~970),(370~450 owk),308~350 wk,(268~315 owk)
氧	OH^-	3750~2000 stg(M)
	$Sn(OH)_6^{2-}$	3000~3400 stg,2200~2300 wk,950~1150 stg,650~800 m,500~550 stg,250~300 stg
	$Sb(OH)_6^-$	≈3200 stg,≈1340 wk,1075~1150 wk,720 与≈580,stg,≈450,300~350
	$BiOX$	480~530 wk,240~375 stg,70~150 m
	UO_2X_2	850~1020 stg(M,SMAX),380~470,250
磷	$H_2PO_2^-$	2300~2400 m-stg(SMAX 2200~2430),1950~1975(owk),1140~1220 stg(OD),1075~1102 wk(OD),1035~1065 wk sp(OD),800~825 m-stg,440~510 wk-m
	HPO_3^{2-}	2340~2400 m stg,1070~1120 stg,1005~1020 wk,970~1000m,570~600 wk m,450~500 wk(D)
	PO_3^-	1200~1350 stg,1040~1150 m-stg,650~800 wk-stg(M),450~600 w-m(M)
	$H_2PO_4^-$	≈2700 wk,≈2400 wk,≈1700,≈1250,≈1100,≈900 bd,530~560,≈450
	HPO_4^{2-}	2750~2900 wk,2150~2500 wk,1600~1900 wk,1200~1410 w-m,1040~1150 stg(OD),950~1110 wk-m,830~920 wk-m,530~570 m(OM),390~430 wk(OM)
	PO_4^{3}	940~1120 stg(OM),540~650 m(OD)
	$P_2O_7^{4-}$	1100~1220 stg(OM),960~1060 wk-m(OD),850~980 m,705~770 w-m,545~580 m-stg (m 500~600)
	PO_3S^{3-}	≈1050,≈945,≈500
	PO_3F^{2-}	1010~1080 stg,1000~1020 m sp. 900~950 wk, 700~770 m,525~540 m-stg
	$PO_2F_2^-$	≈1315 stg,≈1150 stg,≈800 stg,≈500 stg
硫	HSO_4^-	3400~2000(最大值近于≈2900;SMAX 2200~2600),850~900,605~620,565~585,450~480
	$S_2O_3^{2-}$	1080~1150 stg(M 或 SMAX),990~1010 stg,640~690 m-s,540~570 wk (o m)
	$S_2O_5^{2-}$	≈1175 stg,1040~1090 m,970~990 stg,650~660 m,560~570 m,510~540 m,440~450 m
	SO_3^{2-}	990~1090 stg(OM 或 SMAX),615~660 m(O SMAX),470~525 m(OD)
	$S_2O_6^{2-}$	≈1240 stg,≈995 m-stg,≈570 m-stg,≈520m
	$S_2O_7^{2-}$	≈1325 wk,≈1100 stg,≈920 m,≈700 wk,≈550 m
	SO_4^{2-}	1040~1210 stg(OM 或 SMAX),960~1030,570~680 m(OD 或 M)
	$S_2O_6^{2-}$	1260~1310 stg,1050~1070 m,690~740 m,580~600 wk m sp,≈560 m
	SO_3F^-	1260~1300 stg,1070~1080 m,≈740 m,≈580 m,≈480 wk
硒	SeO_3^{2-}	700~770 stg(SMAX 700~850),430~540 m-stg(OD),360~410(OD)
	SeO_4^{2-}	840~910 stg(o wk sh 810~850),390~450 wk m
硅		60~110
	SiO_4^{4-}	860~1175 stg(SMAX),470~540 stg
钛	TiO_3^{2-}	500~700 stg bd,360~450,200~400 bd(SMAX)
锆	ZrO_3^{2-}	700~770(owk),500~600 stg,300~500 stg(SMAX),230~240 wk
锡	SnO_3^{2-}	500~700 stg,300~450
钨	WO_4^{2-}	(920~970 owk),750~900 stg(OM),270~500 wk
	WS_4^{2-}	465
	$PW_{12}O_{40}^{3-}$	1080 m-stg,975 m-stg,890~922 m,810~820 stg,590~600 wk,≈390 wk,≈340 wk,260~270 wk
铀	$U_2O_7^{2-}$	880~900 stg,470~480 m-stg,270~280 wk
钒	VO_4^{3-}	700~900 stg(O SMAX)

表 19-4 无机阴离子的基频振动

元素	离子	点群	频率(振动类型)σ/cm^{-1}
铝	AlH_4^-	T_d	$\sigma_1(a_1)$1790,$\sigma_2(e)$799,$\sigma_3(f_2)$1740,$\sigma_4(f_2)$764
碳	CN^-		$\sigma_{C\equiv N}$ (2030~2239)
	$Fe(CN)_6^{3-}$	O_h	$\sigma_6(f_{1u})$2105,$\sigma_7(f_{1u})$511w,1460vw,$\sigma_8(f_{1u})$387st

续表

元素	离子	点群	频率(振动类型)σ/cm^{-1}
	$Fe(CN)_5NO^{2-}$	C_{4v}	IR a_1 2173,2163,1945,653,468,408 a_2- b_1 2157,b_2-e2145,663,424,417,321 a_1 2174,2152,1947,656,493,472,408,123 拉曼 b_1 2157,410 e2144,422,415,164,100
	$Fe(CN)_6^{4-}$	O_h	σ_6( )2021 和 2033,$\sigma_7(f_{1u})$585s,$\sigma_8(f_{1u})$414m
	OCN^-	$C_{\infty v}$	$\sigma_1(\Sigma^+)$1292.6 和 $2\sigma_2(\Sigma^+)$1205.5 $\sigma_2(\pi)$629.4,$\sigma_3(\Sigma^+)$2169.6
	SCN	$C_{\infty v}$	$\sigma_1(\Sigma^+)$743,$\sigma_2(\pi)$470,$\sigma_3(\Sigma^+)$2066
	CN_2^{2-}	$D_{\infty h}$	$\sigma_1(\Sigma_g^+)$860,$\sigma_2(\pi_u)$210,$\sigma_3(\Sigma_g^+)$930
	CO_3^{2-}	D_{3h}	$\sigma_1(a_1')$1087,$\sigma_2(a''_2)$874,$\sigma_3(e)$1432,$\sigma_4(e')$706
	CS_3^{2-}	D_{3h}	IR $\sigma_1(a'_1)$488～520,$\sigma_2(a''_2)$325,$\sigma_3(e)$920,$\sigma_4(e')$475～520 拉曼 516,510,420,325
硅	SiO_4^4	T_d	$\sigma_1(a_1)$800,$\sigma_2(e)$500,$\sigma_3(f_2)$1050,$\sigma_4(f_2)$625
钛	TiO_3^2	O_h	$\sigma_1(f_{1u})\approx$540 be,$\sigma_2(f_{1u})\approx$400 bd
氮	N_3	$D_{\infty h}$	$\sigma_1(\Sigma_g^+)$1344,$\sigma_2(\pi_u)$645,$\sigma_3(\Sigma_g^+)$2041
	NO_2^-	D_{2v}	$\sigma_1(a_1)$1320～1365,$\sigma_2(a_1)$807～818,$\sigma_3(b_1)$1221～1251
	NO_3^-	D_{3h} C_{2v}	$\sigma_1(a'_1)$1018～1050,$\sigma_2(a''_2)$807～850,$\sigma_3(e)$1310～1405,$\sigma_4(e')$697～716
磷	HPO_3^{2-}	C_{3v}	晶体 $\sigma_1(a_1)$2410,$\sigma_2(a_1)$977,$\sigma_3(a_1)$591,$\sigma_4(e)$1110 和 1083,$\sigma_5(e)$1021 和 1006,$\sigma_6(e)$498 和 471 溶液 $\sigma_1(a_1)$2315,$\sigma_2(a_1)$979,$\sigma_3(a_1)$567 和 $\sigma_4(e)$1085,$\sigma_5(e)$1027,$\sigma_5(e)$465
	$H_2PO_4^-$	S_4	σ_{PO_4}(4b,4c)540 和 450
	HPO_4^{2-}	C_{3v}	$\sigma_1(a_1)$2900,$\sigma_2(a_1)$988,$\sigma_3(a_1)$862,$\sigma_4(a_1)$537,$\sigma_5(e)$1230,$\sigma_6(e)$1076,$\sigma_7(e)$537,$\sigma_8(e)$394
	PO_4^{3-}	T_d	拉曼 $\sigma_1(a_1)$935,$\sigma_2(e)$420,$\sigma_3(f_2)$1080,$\sigma_4(f_2)$550
	$P_2O_7^{4-}$	D_{3h}	(a'_1)1212.909,477,(a''_2)1165,940.553(e'')999,573.432,(e')1124,707,615.201
	PO_3S^{3-}	C_{3v}	$\sigma_1(a_1)$960,$\sigma_2(a_1)$611,$\sigma_3(a_1)$480,$\sigma_4(e)$1038,$\sigma_5(e)$515,$\sigma_6(e)$367
砷	$As_2O_7^{4-}$	D_{3d}	900～920,≈850,≈450,≈300
	AsO_4^{3-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$813,$\sigma_2(e)$342,$\sigma_3(f_2)$813,$\sigma_4(f_2)$402
钒	VO_4^{3-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$870,$\sigma_2(e)$345,$\sigma_3(f_2)$825,$\sigma_4(f_2)$480
硫	$S_2O_3^{2-}$	C_{3v}	$\sigma_1(a_1)$995,$\sigma_2(a_1)$669,$\sigma_3(a_1)$446,$\sigma_4(e)$1123,$\sigma_5(e)$541,$\sigma_6(e)$335
	SO_3^{2-}	C_{3v}	$\sigma(a_1)$1010,$\sigma_2(a_1)$633,$\sigma_3(e)$961,$\sigma_4(e)$496
	SO_4^{2-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$983,$\sigma_2(e)$450,$\sigma_3(f_2)$1105,$\sigma_4(f_2)$983
硒	SeO_3^{2-}	C_{3v}	$\sigma_1(a_1)$807,$\sigma_2(a_1)$432,$\sigma_3(e)$737,$\sigma_4(e)$374
	SeO_4^{2-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$833,$\sigma_2(e)$335,$\sigma_3(f_2)$875,$\sigma_4(f_2)$432
铬	$Cr_2O_7^{2-}$	C_{2v}	(a_1,a_2,b_1,b_2)924～966,(a_1)900～910,(b_1)880～892,(b_1)760～780,(a_1)550～570,(a_1,a_2,b_1,b_2)365;(a_1)220
	CrO_4^{2-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$847,$\sigma_2(e)$348,$\sigma_3(f_2)$884,$\sigma_4(f_2)$368
钼	MoO_4^{2-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$940,$\sigma_2(e)$220,$\sigma_3(f_2)$895,$\sigma_4(f_2)$365
钨	WO_4^{2-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$928,$\sigma_2(e)$320,$\sigma_2(f_2)$833,$\sigma_4(f_2)$405
	WS_4^{2-}	T_d	$\sigma_1(a_1)$487,$\sigma_2(e)$179,$\sigma_3(f_2)$440～465,σ_4
氟	BF_4^-	T_d	$\sigma_1(a_1)$769,$\sigma_2(e)$353,$\sigma_3(f_2)$984(B^{11}) 1016(B^{10}),$\sigma_4(f_2)$524(B^{11})529(B^{10})
	SiF_6^{2-}	O_h	IR$\sigma_3(f_{1u})$720,$\sigma_4(f_{1u})$470 拉曼 $\sigma_1(A_{1g})$656,$\sigma_2(E_g)$510,σ_5(f2g)402,$\sigma_6(f_{2u})$260
	GeF_6^{2-}	O_h	IR $\sigma_3(f_{1u})$600,$\sigma_4(f_{1u})$ 拉曼 $\sigma_1(A_{1g})$627,$\sigma_2(E_g)$454,$\sigma_5(f_{2g})$318
	SnF_6^{2-}	D_{3d}	$\sigma_1(A_{1g})$572,$\sigma_3(a_{2u}$ or eu)555,$\sigma_2(E_g)$460,$\sigma_4(a_{2u}$或 Eu)256,$\sigma_5(A_{2g}$或 $E_g)$247
	PF_5^-	O_h	IR $\sigma_3(f_{1u})$830,$\sigma_4(f_{1u})$550 拉曼 $\sigma_1(A_{1g})$735,$\sigma_2(E_g)$563,$\sigma_5(f_{2g})$462,$\sigma_6(f_{2u})$317
	$TiFe^{2-}$	D_{3d}	$\sigma_1(A_{1g})$608～613,$\sigma_5(A_{2g}$或 $E_g)$275～281
	ZrF_6^{2-}	D_{3d}	$\sigma_1(A_{1g})$576～581,$\sigma_3(a_{2u}$或 $E_u)$500,$\sigma_4(A_{2u}$或 $E_u)$230,$\sigma_5(A_{2g}$或 $E_g)$
氯	$SnCl_6^{2-}$	O_h	拉曼 $\sigma_1(A_{1g})$311,$\sigma_2(E_g)$229,$\sigma_5(F_{2g})$158
	$CuCl_4^{2-}$	T_d	$\sigma_1(a_1)$270～300,$\sigma_2(e)$130～150,$\sigma_3(f_2)$290～300,$\sigma_4(f_2)$110～130
	$PdCl_4^{2-}$	D_{4h}	(a_{2u})170,(e_u)334
	$PdCl_6^{2-}$	O_h	拉曼 $\sigma_1(A_{1g})$317,$\sigma_2(E_g)$292,$\sigma_5(f_{2g})$164
	$PtCl_4^{2-}$	D_{4h}	拉曼 $\sigma_1(A_{1g})$335,$\sigma_2(B_{1g})$164,$\sigma_4(B_{2g})$304
	ClO_2^-	C_{2v}	$\sigma_1(a_1)$790,$\sigma_2(a_1)$400,$\sigma_3(b_1)$840
	ClO_3^-	C_{3v}	$\sigma_1(a_1)$910,$\sigma_2(a_1)$617,$\sigma_3(e)$960,$\sigma_4(e)$493
	ClO_4^-	T_d	$\sigma_1(a_1)$935,$\sigma_2(e)$460,$\sigma_3(f_2)$1050～1170,$\sigma_4(f_2)$630
溴	BrO_3^-	C_{3v}	$\sigma_1(a_1)$806,$\sigma_2(a_1)$421,$\sigma_3(e)$836,$\sigma_4(e)$356
碘	IO_3^-	C_{3v}	$\sigma_1(a_1)$779,$\sigma_2(a_1)$390,$\sigma_3(e)$826,$\sigma_4(e)$330
	IO_4^-	T_d	$\sigma_1(a_1)$791,$\sigma_2(e)$256,$\sigma_3(f_2)$853,$\sigma_4(f_2)$325
锰	MnO_4^{2-}		$\sigma_3\approx$840
	MnO_4^-	T_d	$\sigma_1(a_1)$840,$\sigma_2(e)$340～350,$\sigma_3(f_2)\approx$900,$\sigma_4(f_2)\approx$387

四、有机化合物官能团的红外特征频率

表 19-5 至表 19-54 列出了各类有机化合物官能团的红外特征频率[1~3]，表中所用符号：s—强；vs—特强；m—中；w—弱；v—可变。

（一）烃类化合物

1. 链烷烃和环烷烃

当 CH_3、CH_2 直接和 N、O 等电负性高的原子相连时，其伸缩振动和变形振动都要发生显著的位移，为便于集中讨论，在烷烃这一节中同时给出了和杂原子相连的 C—H 伸缩振动和变形振动。

表 19-5 烷烃 C—H 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
$>C—CH_3$	2975～2950	3.36～3.39	m-s	不对称 C—H 伸缩
	2885～2865	3.47～3.49	m	对称 C—H 伸缩
$—C—CH_2—C—$	2940～2915	3.40～3.45	m-s	不对称 C—H 伸缩
	2870～2840	3.49～3.52	m	对称 C—H 伸缩
$>CH$	2890～2880	3.46～3.47	W	伸缩；无实际用处
$Ar—CH_3$	2985～2965	3.35～3.37	m-s	不对称伸缩
	2955～2935	3.38～3.41	m-s	不对称伸缩；邻位取代出现在范围的低的部分
	2930～2920	3.41～3.42	m-s	对称伸缩
	2870～2860	3.48～3.50	m	变形振动倍频
	2830～2740	3.53～3.65	w-m	变形振动倍频
环丙烷，$—CH_2—$	3100～3070	3.23～3.26	m	不对称伸缩
	3035～2995	3.30～3.34	m	对称伸缩
环丁烷，$—CH_2—$	3000～2975	3.33～3.36	m	不对称伸缩
	2925～2875	3.42～3.48	m	对称伸缩
环戊烷 $—CH_2—$	2960～2950	3.38～3.39	m	不对称伸缩
	2870～2850	3.48～3.51	m	对称伸缩
环己烷 $—CH_2—$	同 $—C—CH_2—C—$			

表 19-6 烷烃 C—H 变形振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
$—CH_3$	1465～1440	6.83～6.94	m	不对称变形
	1390～1370	7.19～7.30	m-s	对称变形，C—CH_3 的特征
$>C(CH_3)_2$	1385～1380	7.22～7.25	m-s	对称变形；两峰强度几乎相等
	1370～1365	7.30～7.33		
$—C(CH_3)_3$	1395～1385	7.17～7.22	m	对称变形；一般是低频率
	1370～1365	7.30～7.33	m-s	谱带强
$>CH_2$	1480～1440	6.76～6.94	m	剪式振动
$>CH$	≈1340	≈7.46	w	变形；无实际用处
$—C—(CH_2)_n—C—$ $(n\geqslant4)$	725～720	13.79～13.89	w-m	CH_2 面内摇摆；固态烃（结晶）CH_2 面内摇摆分裂为 732，722cm^{-1} 双峰，强度剧烈增加
$—(CH_2)_3—$	735～725	13.61～13.79	w-m	
$—(CH_2)_2—$	745～735	13.42～13.61	w-m	
$—CH_2—$	785～770	12.74～12.99	w-m	

表 19-7 烷烃 C—C 骨架振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
$>C(CH_3)_2$	1175～1165	8.51～8.58	m	骨架振动，若中心碳原子没有氢，一谱带在大约 $1190cm^{-1}$
	1150～1130	8.90～8.85	m	
	840～790	1190～12.66	w	
	495～490	20.20～20.41	w	
$—C(CH_3)_3$	1255～1245	7.98～8.03	m	骨架振动
	1225～1165	8.17～8.58	m	
$—CH(C_2H_5)_2$	510～505	19.61～19.80	w	
直链烃	540～485	18.52～20.62	w	正戊烷没有
	≈455	≈21.98	w	
支链烷烃	570～445	17.54～22.47	w	至少一个谱带
单支链烷烃	560～540	17.86～18.52	w	
	470～445	21.28～22.47	w	
双支链烷烃(非甲基或乙基)	555～535	18.02～18.69	w	
3,3-双支链烷烃	≈530	≈18.87	w	
2,2-双支链烷烃	≈490	≈20.41	w	
具有三个或以上支链烷烃	≈515	≈19.42	w	
甲基苯	390～260	25.64～38.46	m	芳香 $C—CH_3$ 键面内弯曲
乙基苯	560～540	17.70～18.52	m-s	$═C—C—C$ 基的面内弯曲
异丙基苯	545～520	18.32～19.23	m	$═C—C—C$ 基的面内弯曲
丙基和丁基苯	585～565	17.09～17.70	m	两个谱带
环丙烷	1030～1000	9.71～10.00	w	常在大约 $1020cm^{-1}$
	870～850	11.49～11.76	v	常不存在
	540～500	18.52～20.00	v	
环丁烷	1000～960	10.00～10.42	w	
	930～890	10.75～11.24	w	
	580～490	17.24～20.41	s	
环戊烷	1000～960	10.00～10.42	w	
	930～890	10.75～11.24	w	
	595～490	16.81～20.41	s	
环己烷	1055～1000	9.48～10.00	w	
	1015～950	9.86～10.53	w	
	570～435	17.54～22.99	v	

表 19-8 连于杂原子上的 C—H 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
$—O—CH_3$(醚)	2995～2955	3.34～3.38	s	不对称 CH_3 伸缩
	2900～2865	3.45～3.49	s	对称 CH_3 伸缩
	2835～2815	3.53～3.55	s	对称 CH_3 伸缩
$RSCH_3$	2995～2955	3.34～3.38	m	不对称 CH_3 伸缩
	2900～2865	3.45～3.49	m	对称 CH_3 伸缩
$N—CH_3$ (胺和亚胺)	2820～2760	3.55～3.62	s	对称 CH_3 伸缩
$N—CH_3$(脂肪族胺)	2805～2780	3.56～3.60	s	对称 CH_3 伸缩
$N—CH_3$(芳香族胺)	2820～2810	3.55～3.56	s	对称 CH_3 伸缩
$—N(CH_3)_2$(脂肪族胺)	2825～2810	3.54～3.56	s	对称 CH_3 伸缩
	2775～2765	3.60～3.62	s	
$—N(CH_3)_2$(芳香族胺)	2830～2800	3.53～3.57	s	对称 CH_3 伸缩
$CH_3—CO—$(酮)	3000～2900	3.33～3.45	w	对称 CH_3 伸缩
$X—CH_2—(X = 卤素)$	≈3050	≈3.28	w	C—H 伸缩
$—O—CH_2—O—$	2820～2710	3.55～3.69	m	C—H 伸缩
O H_2C——C<	3050～3030	3.28～3.03	w	不对称 C—H 伸缩
O —HC——C<	3000～2990	3.33～3.34	w	C—H 伸缩
NH >C——CH_2	≈3050	≈3.28	m-s	不对称 C—H 伸缩

表 19-9 连于杂原子上的 C—H 变形振动

官能团	范围 σ/cm^{-1}	范围 $\lambda/\mu m$	强度	备注
$—O—CH_3$	1470～1430	6.80～6.99	m	不对称变形
	1445～1430	6.92～6.99	s	对称变形
	≈1030	≈9.71	w-m	C—C 振动，常观察到
$—O—CH_2—$(酯)	1475～1460	6.78～6.89	m-s	CH_2 对称变形
醚(无环的)	1470～1435	6.80～6.97	m-s	CH_2 对称变形
醚(环，小环)	1500～1470	6.67～6.80	中	对称变形，几个带
$—O—CO—CH_3$	1450～1400	6.90～7.14	s	不对称变形
	1389～1340	7.22～7.46	s	对称变形
$—CO—CH_3$(酮)	1450～1400	6.90～7.14	s	不对称变形
	1360～1355	7.35～7.38	s	对称变形
$—CO—CH_2—$(小环酮)	1475～1425	6.78～7.02	s	不对称变形，几个带
$—CO—CH_2—$(无环酮)	1435～1405	6.97～7.12	s	不对称变形
$—CH_2—COOH$	≈1200	≈8.33	m	CH_2 变形
乙酰丙酮化物	1415～1380	7.07～7.25	s	不对称变形
	1360～1355	7.35～7.38	s	对称变形
$>C\overset{O}{—}CH_2$	≈1500	≈6.67	w-m	不对称弯曲
$>CHOH$(仲醇)(游离态)	1410～1350	7.09～7.41	w	CH 变形
	1300～1200	7.69～8.33	w	CH 变形
仲醇(键合)	1440～1400	6.94～7.14	w	CH 变形
	1350～1285	7.41～7.78	w	CH 变形
$—(CH_2)_n—O—(n>4)$	745～735	13.42～13.61	m-s	CH_2 变形
$>N—CH_3$	1440～1390	6.94～7.19	m	对称变形
$>N—CH_3$(胺盐酸盐)	1475～1395	6.78～7.17	m	对称变形
$>N—CH_3$(氨基酸盐酸盐)	1490～1480	6.71～6.76	m	对称变形
$N—CH_3$(酰胺)	1420～1405	7.04～7.12	s	对称变形[不对称变形(1500～1450)cm^{-1}]
$>N—CH_2—$(酰胺)	≈1440	≈6.94	m	
$>N—CH$ (胺)和具有 $—O—CH$ 的基团，如乙缩醛、原甲酸酯和过氧化物	1350～1315	7.41～7.61	w	CH 变形
$N—CH_2—$	1480～1450	6.76～6.90	s	对称变形(两个带)
	1400～1350	7.14～7.41	m-s	
$—CH_2—NO_2$	1425～1415	7.02～7.07	s	对称变形
$—CH_2—CN$	1430～1420	6.99～7.04	s	对称变形
$—CH_2—C=C<$	1445～1430	6.92～6.99	m	
$X—CH_2—$ (X=卤素，$X\neq F$)	1435～1385	6.97～7.22	m	CH_2 的面外摇摆在(1300～1240)cm^{-1}(强)
$F—CH_3$	≈1475	≈6.78	m	对称变形
$Cl—CH_3$	≈1355	≈7.38	m	对称变形
$Br—CH_3$	≈1305	≈7.61	m	对称变形
$I—CH_3$	≈1250	≈7.98	m	对称变形
$P—CH_3$	1320～1280	7.58～7.81	s	对称弯曲
$S—CH_3$	1325～1300	7.55～7.69	m-w	对称变形
$S—CH_2—$	1440～1415	6.94～7.07	s	对称变形[CH_2 面外摇摆在(1270～1220)cm^{-1}(强)]
$Se—CH_3$	≈1280	≈7.81	m	对称变形
$B—CH_3$	1460～1405	6.85～7.12	m	不对称变形
	1320～1280	7.58～7.81	m	对称变形
$Si—CH_3$	1265～1250	7.91～8.00	m-s	对称弯曲 (CH_3 的面内摇摆在(900～700)cm^{-1}有强谱带)
$Sn—CH_3$	1200～1180	8.33～8.48	m	对称弯曲
$pb—CH_3$	1170～1155	8.55～8.66	m	对称弯曲

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
As—CH_3	1265～1240	7.91～8.07	m	对称变形
Ge—CH_3	1240～1230	8.07～8.13	m	对称变形
Sb—CH_3	1215～1195	8.23～8.37	m	对称变形
Bi—CH_3	1165～1145	8.58～8.73	m	对称变形
—CH_2—SO_2—	≈1250	≈8.00	m	对称变形
—CH_2— 金属 金属=Cd,Hg,Zn,Sn	1430～1415	6.99～7.07	m	CH_2 变形

2. 烯烃

表 19-10 烯烃 C═C 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
孤立 C═C	1680～1620	5.95～6.17	w-m	具有对称中心的化合物可能不存在
与芳基共轭 C═C	1640～1610	6.10～6.21	m	
与 C═C 或 C═O 共轭 C═C	1660～1580	6.02～6.33	s	
共轭，CH_2═CH—C═C—	1620～1610	6.17～6.21	s	
乙烯基端基				
—CH═CH_2	1645～1640	6.08～6.10	w-m	烯烃
X—CH═CH_2（X=卤素或氰基）	1620～1595	6.17～6.27	s	X=F，$\sigma\approx1650cm^{-1}$
—O—CH═CH_2 乙烯基醚	1640～1630 1620～1610	6.49～6.54 6.12～6.21	s s	通常在(1640～1610)cm^{-1}呈现双峰
—CO—CH═CH_2 乙烯基酮	1620～1615	6.17～6.19	s	
CH_2═CHOCOR 乙烯基酯	1700～1645	5.88～6.08	s	
CH_2═CHCOOR 丙烯酸酯	1640～1635	6.10～6.12	s	
	1625～1620	6.16～6.17	s	
1,2-亚乙烯基				
顺式 —CH═CH—	1665～1635	6.01～6.12	w-m	烃类
反式 —CH═CH—	1675～1665	5.97～6.02	w-m	烃类
亚乙烯基				
>C═CH_2	1660～1664	6.02～6.10	w-m	
卤代和氰基取代 >C═CH_2	1630～1620	6.14～6.17	v	二氟取代在大约 1730cm^{-1}
—CO—C═CH_2，酮	≈1630	≈6.14	m s	
—CO—O—C═CH_2，酯	1675～1670	5.97～5.99	s	
α,β-不饱和胺，CH_2═CN<	1700～1660	5.88～6.02	m	
三取代烯烃				
>C═CH—	1690～1665	5.92～6.01	w m	邻位 C═O 降低频率，增加强度
CH_2═CF—	1650～1645	6.06～6.08	m	
CF_2═CF—	1800～1780	5.56～5.62	m	
>C═CF_2	1755～1735	5.70～5.76	m	
>C═C—N<	1680～1630	5.95～6.13	m-s	比正常的 C═C 伸缩带强
四取代烯烃				
>C═C<	1690～1670	5.92～5.99	w	具有对称中心的化合物可能不存在
内双键				
环丙烯	≈1655	≈6.04	w-m	
环丁烯	≈1565	≈6.39	w-m	
环戊烯	≈1610	≈6.21	w-m	
环己烯	≈1645	≈6.08	w-m	
环庚烯	≈1650	≈6.06	w-m	
1,2-二烷基环丙烯	1900～1865	5.26～5.36	w-m	
1,2-二烷基环丁烯	1685	≈5.93	w-m	
1,2-二烷基环戊烯	1685～1670	5.93～5.65	w-m	
1,2-二烷基环己烯	1685～1675	5.93～5.63	w-m	

续表

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
环外双键：>C=C⌒(CH₂)ₙ				
n=2	1780~1730	5.62~5.78	m	随环的增大向低频移动
n=3	≈1680	≈5.95	m	
n=4	≈1655	≈6.04	m	
n=5	≈1650	≈6.06	m	
亚甲基环戊二烯	≈1645	≈6.08	m	
亚甲基茚 $C_6H_4CH=CHC=CH_2$	≈1630	≈6.13	m	
A—CH=CH₂	1650~1580	6.23~6.33	v	A=重元素或包含重元素的基团和C=C直接相连
$M(C_2H_4)$	1530~1500	6.54~6.67		M=金属元素例 $Pt(C_2H_4)$

表 19-11 烯烃 C=C 伸缩振动和变形振动

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
乙烯基端基				
乙烯基烃类化合物，—CH=CH₂	3095~3075	3.23~3.25	m	CH_2 的 CH 伸缩振动
	3030~2995	3.30~3.34	m	CH 的 CH 伸缩振动
	1985~1970	5.04~5.08	w	倍频
	1850~1800	5.41~5.56	w	倍频
	1420~1410	7.04~7.09	w	CH_2 的面内变形，剪式
	1300~1290	7.69~7.75	w	CH 面内变形
	995~980	10.05~10.20	m	CH 面外变形
	915~905	10.93~11.05	s	CH_2 面外变形，对共轭不敏感
乙烯基卤化物	945~925	10.58~10.83	m	CH 面外变形（氟基取代化合物，960cm⁻¹）
	905~865	11.05~11.56	s	CH_2 面外变形（乙烯基氟化物，960cm⁻¹）
乙烯基醚，—O—CH=CH₂	965~960	10.36~10.42	s	CH 面外变形
	945~940	10.58~10.64	m	CH 面外变形
	820~810	12.20~12.35	s	CH_2 面外变形
乙烯基酮，—COCH=CH₂	995~980	10.05~10.20	s	CH 面外变形
	965~955	10.36~10.47	m	CH_2 面外变形
乙烯基酯，CH₂=CHOCOR	950~935	10.53~10.70	s	CH 面外变形
	870~850	11.49~11.76	s	CH_2 面外变形
丙烯酸酯，CH₂=CHCOOR	985~980	10.15~10.20	s	面外变形
	965~960	10.36~10.42	s	面外变形
亚乙烯基				
烃类，>C=CH₂	3095~3075	2.53~2.67	m	CH 不对称伸缩
	2985~2970	3.35~3.37	m	CH 对称伸缩
	1800~1780	5.56~5.62	w	倍频
	1420~1410	7.04~7.09	w	CH_2 面内变形，剪式
	1320~1290	7.58~7.75	w	CH_2 面内变形
	895~885	11.17~11.30	s	CH_2 面外变形
单和双卤代 >C=CH₂	880~865	11.36~11.56	s	CH_2 面外变形（双氟取代在大约 805cm⁻¹）
氧基取代 >C=CH₂				
—CO—C=CH₂(酮和酯)	930~895	10.75~11.17	s	CH_2 面外变形
—CO—O—C=CH₂(酯)	≈930	≈11.07	s	CH_2 面外变形
	880~865	11.36~11.56	s	CH_2 面外变形
1,2-亚乙烯基				
顺式 —CH=CH—(烃类)	3040~3010	3.29~3.32	m	CH 伸缩
	1420~1400	7.04~7.14	w	CH 面内变形
	730~665	13.70~15.04	s	CH 面外变形，共轭增加频率范围至 820cm⁻¹
卤代顺式 —CH=CH—	780~770	12.82~12.99	s	
反式 —CH=CH—(烃类)	3040~3010	3.29~3.32	m	CH 伸缩
	1325~1290	7.55~7.75	w	CH 面内变形，有时不存在

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
	980～955	10.20～10.47	s	CH 面外变形（通常≈965cm⁻¹），共轭使频率稍增加，极性基团显著的降低频率，对反式-反式系统可能至大约1000cm⁻¹
卤代反式 —CH═CH—	≈930	≈10.75	s	CH 面外变形
反式 —CH═CH— 与 C═C 或 C═O 共轭	≈990	≈10.10	s	CH 面外变形
反式 —CH═CH—O—(醚)	940～920	10.64～10.87	s	
三取代烯烃				
>C═CH—(烃类)	3040～3010	3.29～3.32	m	CH 伸缩
	1680～1600	5.95～6.25	w	倍频
	1350～1340	7.41～7.46	m	CH 面内变形
	850～790	11.76～12.65	m	CH 面外变形，电负性基团取代出现在频率范围的低频
环烯(内双键)	3060～2995	3.27～3.34	m	═C—H 伸缩，随环变小向高频移动
	780～665	12.82～15.04	m	面外变形
CH_2═CH—M (M＝金属)	1410～1390	7.09～7.19	w	CH_2 变形
	1265～1245	7.91～8.03	w-m	CH 面内摇摆
	1010～985	9.90～10.15	m	CH 面外振动
	960～940	10.42～10.64	s	CH_2 面外振动
亚甲基环戊二烯	≈765	≈13.07	s	CH 面外变形（在 1370～1340cm⁻¹处有一强带，这是不饱和五元环的特征）
亚甲基萘	≈790	≈12.66	s	CH 面外变形

表 19-12 烯烃的骨架振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
R—CH═CH_2	≈635	≈15.75	s	卷曲振动
	≈550	≈18.18	s	
	485～445	20.62～22.47	m-s	
顺式烯烃	670～455	14.93～2.98	s	两个带
反式烯烃	455～370	21.98～27.03	m-s	通常为一个带
无支链顺式 R—CH═CH—CH_3	490～465	20.41～21.51	s	
无支链反式 R—CH═CH—CH_3	325～285	30.77～35.09	s	
顺式 R_1CH═CHR_2	630～575	15.87～17.39	s	
	500～475	20.00～21.05	s	
反式 R_1CH═CHR_2	580～515	17.24～19.42	m-s	
	500～480	20.00～20.83	m-s	
	455～370	21.98～27.03	m-s	
R_1R_2C═CH_2	560～530	17.86～18.87	s	
	470～435	21.28～22.99	m	
R_1R_2C═CHR_3	570～515	17.54～19.42	s	平面摇摆振动，强度可能为中等
	525～470	19.05～21.28	s	可能为面外弯曲振动
芳基烯烃	450～395	22.22～25.32	m-s	
	～550	～18.18	m	

3. 炔烃

表 19-13 炔烃 C—H 伸缩振动，C≡C 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
≡C—H 单取代炔烃	3340～3330	2.99～3.03	s	峰形尖，ν_{OH}和ν_{NH}出现在同一范围，$\nu_{\equiv C-H}$

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
—C≡CH	2140～2100	4.67～4.76	w-m	C≡C 伸缩振动
双取代炔烃	2260～2190	4.43～4.57	v	随分子对称性的增加强度减弱($\nu_{C\equiv C}$)
共轭炔烃	2270～2220	4.41～4.51	m	和 C═C 共轭($\nu_{C\equiv C}$)
	≈2250	≈4.43		和 COOH 或 COOR 共轭($\nu_{C\equiv C}$)

表 19-14　炔烃的其他谱带

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
单取代炔烃	1375～1225	7.27～3.03	w-m	CH 非平面摇摆振动倍频
—C≡CH	695～575	14.39～17.39	m-s	CH 变形，若分子有轴对称呈现两个带
烷基单取代炔烃	≈630	≈15.87	s	C≡C—H 弯曲振动
	355～335	28.17～29.85	v	C—C≡CH 变形
—C≡CH	510～260	19.61～38.61	v	非烷基取代
R—C≡C—CH_3	520～495	19.23～20.20	m-s	
R—C≡C—C_2H_5	495～480	20.20～20.83	s	宽
R—C≡C—$(CH_2)_2CH_3$	475～465	21.05～21.51	m	
—C≡C—取代苯	≈550	≈18.18	m	
	≈350	≈28.57	v	
C≡C—X (X=Cl,Br,或 I)	185～160	54.05～62.50	v	C≡C—X 弯曲振动

4. 芳烃

表 19-15　芳烃 ═C—H 和环 C═C 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
═C—H	3080～3010	3.25～3.32	m	出现一组谱峰(3—4 个)$\nu_{=C-H}$
—C═C—	1625～1590	6.16～6.29	v	通常在大约 1600cm⁻¹
	1590～1575	6.29～6.35	v	若共轭在 1580cm⁻¹出现强谱带
	1520～1470	6.56～6.80	v	有吸电子基团取代时通常在大约 1470cm⁻¹，有给电子基团取代时通常在大约 1510cm⁻¹
	1465～1430	6.38～6.99	v	

表 19-16　芳环上 ═C—H 非平面变角振动频率

邻位 H 数目	取代类型	振动频率	强度
5	单取代	770～730	vs
		710～690	s
4	邻位(1,2-二取代)	770～735	vs
3	1,3-二取代 1,2,3—三取代	810～750 710～690	vs
2	1,4-二取代 1,2,4-三取代 1,2,3,4-四取代	860～800	vs
1	1,3-二取代 1,2,4-三取代 1,3,5-三取代 1,2,3,5-四取代 1,2,4,5-四取代 1,2,4,6-四取代 1,2,3,4,5-五取代	900～860 1,2,4-三取代还有(825～805)cm⁻¹吸收带 1,3,5-三取代还有 (860～810) cm⁻¹ (强) 和 (730～675)cm⁻¹(强)吸收带 1,2,3,5-四取代还有(850～840)cm⁻¹吸收带	m

芳香族化合物在 (2000～1660) cm⁻¹区域出现数量为 (2～6) 个的一组吸收带。它是由苯环上 ═C—H 面外弯曲 ($\gamma_{=CH}$) 振动的倍频和合频 (泛频) 产生的。各种不同取代类型的芳香族化合物具有典型的吸收图形，见图 19-1。

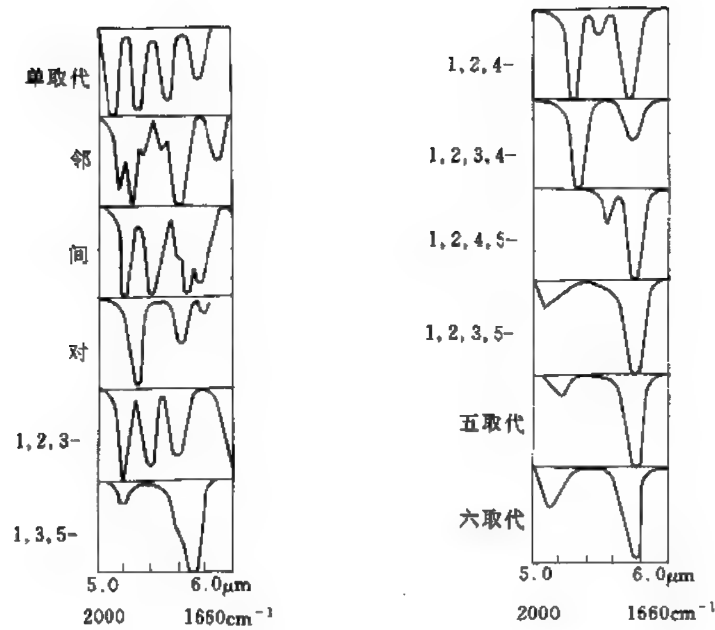


图 19-1 (2000~1660) cm^{-1}取代苯的泛频

(二) 含 C═N 和 N═N 基团的化合物

1. 肟、亚胺及脒等

表 19-17 肟、亚胺、脒等 C═N 伸缩振动

官能团	范围 σ/cm^{-1}	范围 $\lambda/\mu m$	强度	官能团	范围 σ/cm^{-1}	范围 $\lambda/\mu m$	强度
脂肪肟和亚胺 >C═N—	1690~1650	5.92~6.06	w	吖嗪 >C═N—N═C<	1670~1600	5.99~6.25	
α,β-不饱和肟芳香肟和亚胺	1650~1620	6.06~6.17	m	苯甲脒 C_6H_5—C(═N—)—N—	1630~1590	6.14~6.29	
共轭环系统(肟和亚胺)	1660~1480	6.02~6.76	v				
R_1R_2C═N—H	1650~1640	6.06~6.10	s①	—CO—C═N—N	1600~1530	6.25~6.54	vs
Ar(R)C═N—H	1635~1620	6.12~6.17	m	脒和胍 >N—C═N—	1685~1580	5.93~6.33	v
R—CH═N—$R_2$②	1690~1630	5.92~6.13	v	亚氨基醚 —O—C═N—	1690~1645	5.92~6.08	v③
Ar—CH═N—Ar	1645~1605	6.08~6.23	v④	—S—C═N—	1640~1605	6.10~6.23	v
胍 >N—C(—N)═N	1725~1625	5.80~6.15	s	亚胺基氧化物 C═N^+—O^-	1620~1550	6.17~6.45	s

①尖峰;②席夫碱;③常为双峰;④由于旋转异构常为强的双峰。

表 19-18 肟、亚胺、脒等其他键的振动

官能团	范围 σ/cm^{-1}	范围 $\lambda/\mu m$	强度	备注
肟	3650~3500	2.74~2.86	v	游离 O—H 伸缩稀溶液
	3300~3130	3.03~3.20	v	缔合 O—H 伸缩
	1475~1315	6.78~7.60	m	O—H 变形
	960~930	10.42~10.75	s	N—O 伸缩
酮肟	3540~2700	2.82~3.70	s	缔合 O—H 伸缩

续表

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
O=⟨⟩=N—OH	1670～1620	5.99～6.17	s	C═O 伸缩
	1560～1520	6.37～6.58	s	C═N 伸缩
亚胺	3400～3300	2.94～3.03	v	游离 N—H 伸缩
	3400～3100	2.94～3.23	m	缔合 N—H 伸缩
—N—D	2600～2400	3.85～4.15	w-m	游离 N—D 伸缩

2. 偶氮化合物

表 19-19 偶氮化合物的振动

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
烷基偶氮化合物	1575～1555	6.35～6.43	v	N═N 伸缩
α,β-不饱和偶氮化合物	≈1500	≈6.67	v	
反式芳香偶氮化合物	1440～1410	6.94～7.09	w	N═N 伸缩
顺式芳香偶氮化合物	≈1510	≈6.62	w	N═N 伸缩
脂肪氧化偶氮化合物	1530～1495	6.54～6.69	m-s	吸电子基团的存在使频率
—N═N⁺—O⁻	1345～1285	7.43～7.78	m-s	增加
芳香氧化偶氮化合物	1480～1450	6.76～6.90	m-s	反对称 N═N—O 伸缩
—N═N⁺—O⁻	1340～1315	7.46～7.60	m-s	对称 N═N—O 伸缩
	1465～1445	6.83～6.92	w	N═N 伸缩
—N═N⁺—S	1070～1055	9.35～9.48	w	N—S 伸缩
C(N═N) 环	≈1620	≈6.17	w	N═N 伸缩

（三）含 X≡Y 基团的三键化合物和含 X═Y═Z 基团的连双键化合物

含 X≡Y 基团的三键化合物有腈、氰酸盐、硫氰酸盐、异腈和重氮化合物等，异氰酸酯和异硫氰酸酯是含有 X═Y═Z 基团的连双键化合物的两个重要例子。各种类型的 X≡Y 和 X═Y═Z 基团的振动频率见表 19-20。

表 19-20 各种类型的 X≡Y 和 X═Y═Z 基团的振动频率

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
脂肪族 —C≡N	2260～2240	4.42～4.46	m	当腈基与其他不饱和基团共轭或与氮基直接相连时，$\nu_{(C\equiv N)}$向低频位移，强度增加。当 α-碳原子上有极性取代基团(如 Cl、OH、OCH_3、C═O、NH_2 等)时，共强度变得很弱。当—C≡N 接到叔碳原子上时，强度极弱，以至看不到吸收
芳香族 —C≡N	2240～2215	4.46～4.51	s	
氰酸酯 —O—C≡N	2250	4.44	s	—O—C≡N 的反对称伸缩振动，常为多重峰
硫氰酸酯 —S—C≡N				
脂肪族 —S—C≡N	≈2140	4.67	vs	—S—C≡N 的反对称伸缩振动
芳香族 —S—C≡N	2175～2160	4.60～4.63	vs	—S—C≡N 的反对称伸缩振动
异氰酸酯 —N═C═O	2275～2250	4.40～4.44	vs	—N═C═O 反对称伸缩振动，共轭对该吸收无影响
	1350	7.41	w	—N═C═O 对称伸缩振动，由于强度弱，又与 $\delta_{(CH)}$吸收带重叠，无实用价值
异硫氰酸酯 —N═C═S				
脂肪族 —N═C═S	2140～2080	4.67～4.81	vs	—N═C═S 反对称伸缩振动 有时变宽，常常分裂，在主要吸收带两旁常伴有肩带。脂肪族 1090cm⁻¹(强)；芳香族 1250cm⁻¹(弱)和 930cm⁻¹(强)
芳香族 —N═C═S	2090～2040	4.78～4.90	vs	

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
二氧化碳	2350	4.26	s	O═C═O 反对称伸缩振动 其他两吸收带为 $720cm^{-1}$和 $667cm^{-1}$，三组吸收带均可用于波数校正
烯酮	2150	4.65		C═C═O 反对称伸缩振动
丙二烯	2000～1915	5.00～5.22	m	C═C═C 反对称伸缩振动
	1100～1000	9.09～10.0	w	C═C═C 对称伸缩振动 当与极性基团(如 COOH、COOR、$CONH_2$、CN、CF_3 等)相连时，往频率较高的一侧位移，在液相中分裂为双峰 当处于端基时（C═C═CH_2 或 C═C═CHR），在(870～840)cm^{-1}出现较强的 $\delta_{(CH)}$频率
乙烯亚胺	2000	5.00		C═C═N 反对称伸缩振动
碳二亚胺	2155～2115	4.64～4.73	vs	脂肪族为单峰芳香族为多重峰
重氮盐				═N═N 反对称伸缩振动
RCH═$N^{\oplus}$═$N^{\ominus}$	2050～2035	4.88～4.91		
R_2C═$N^{\oplus}$═$N^{\ominus}$	2030～2000	4.93～5.00		
重氮酮				═N═N 反对称伸缩振动；脂肪族和芳香族 $\nu_{(C=O)}$分别在 $1645cm^{-1}$和(1630～1605)cm^{-1}
—CO—CHN_2	2100～2090	4.76～4.78		
—CO—CRN_2	2070～2060	4.83～4.85		
重氮离子盐	2280～2240	4.39～4.46		—$N_2^{\oplus}$ 反对称伸缩振动
叠氮化合物	2120～2080	4.72～4.81	s	—N_3 反对称伸缩振动，尖锐，有少数化合物为双峰

（四）醇和酚

表 19-21　羟基 O—H 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
游离 O—H	3670～3580	2.73～2.80	v	尖峰，OH 伸缩
氢键缔合 O—H (分子间)，—O—H…H—O— 或 H…O—H…O…	3550～3230	2.82～3.10	m-s	通常峰形宽，振动频率与浓度有关
氢键缔合 O—H (分子内)，H…O—O	3590～3400	2.79～2.94	v	通常峰形窄，振动频率与浓度无关
螯合 O—H，(O—H…O═C—C═C 六元环)	3200～2500	3.13～4.00	v	通常峰形宽，振动频率与浓度无关
—OD	2780～2400	3.60～4.17	v	O—D 伸缩
OH(β-二酮的醇式)	2700～2500	3.71～4.00	v	螯合 OH
分子内缔合的邻位酚	3200～2500	3.13～4.00	m	游离酚～$3610cm^{-1}$
羧酸，—COOH	3300～2500	3.03～4.00	w-m	O—H 伸缩，氢键缔合，在(2700～2500)cm^{-1}范围有时出现几个弱带，振动频率与浓度有关
OH(结晶水)	3600～3100	2.78～3.23	w	在固态光谱中
	1630～1615	6.13～6.19	v	
OH(在稀溶液中的水)	≈3760	～2.66	w-m	在非极性溶剂中
游离肟，>C═N—OH	3600～3570	2.78～2.79	w-m	sh
游离氢过氧化物，—O—O—H	3560～3530	2.82～2.83	m	
过酸 —CO—O—OH	≈3280	≈3.05	m	

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
环庚三烯酚酮	≈3100	≈3.23	w-m	
磷酸 $>P(=O)OH$	2700～2560	3.70～3.91	m	br

表 19-22 羟基 O—H 变形振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
伯、仲醇	1350～1260	7.41～7.94	s	面内变形
叔醇	1410～1310	7.09～7.63	s	面内变形
醇	700～600	14.29～16.67		宽，面外变形
酚	1410～1310	7.09～7.63	s	O—H 变形和 C—O 伸缩的合
羧酸	955～915	10.47～10.93	s	面外变形，宽
氘代羧酸	≈675	≈14.81	s	O—D 面内变形

表 19-23 醇 C—O 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
饱和伯醇 $—CH_2—OH$	1085～1030	9.22～9.71	s	
饱和仲醇 $>CH—OH$	1125～1085	8.90～9.22	s	
饱和叔醇 $-\!\!\!>C—OH$	1205～1125	8.30～8.90	s	
伯醇				
RCH_2CH_2OH	≈1050	≈9.52	s	乙醇 ≈1065cm⁻¹
$R_1R_2CHCH_2OH$	≈1035	≈9.66	s	
$R_1R_2R_3CCH_2OH$	≈1020	≈9.80	s	
不饱和基团 $—CH_2CH_2OH$	≈1015	≈9.85	s	乙烯基或丙烯基取代
仲醇				
RH_2C / H_3C >CHOH	≈1085	≈9.22	s	异丙醇≈1100cm⁻¹每增加一个烷基，波数增加约 15cm⁻¹
不饱和基团 $—CH_2CH(OH)CH_3$	≈1070	≈9.35	s	
[(不饱和基团)CH_2]$_2$—CHOH	≈1010	≈9.90	s	
(芳基-CH_2)$_2$CHOH	≈1050	≈9.52	s	
叔醇				
$RCH_2(CH_3)_2COH$	≈1135	≈8.81	s	叔丁醇≈1150cm⁻¹
$(R_1CH_2)(R_2CH_2)_2COH$	≈1120	≈8.93	s	每增加一个烷基波数增加约 15cm⁻¹
不饱和基团				
$—CH_2(CH_3)_2COH$	≈1120	≈8.93	s	
[(不饱和基团)—CH_2]$_2$—CH_3COH	≈1060	≈9.43	s	
[(不饱和基团)—CH_2]$_3$—COH	≈1010	≈9.90	s	
芳基和 α-不饱和仲醇	1085～1030	9.22～9.71	s	
α-不饱和醇和环叔醇	1125～1085	8.90～9.22	s	
脂环仲醇(三元或四元环)	1060～1020	9.43～9.80	s	
脂环仲醇(五元或六元环)	1085～1030	9.22～9.71	s	
酚	1260～1180	7.94～8.48	s	O—H 变形和 C—O 伸缩合频

表 19-24 酚 O—H 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
游离	3620～3590	2.76～2.79	m	在稀溶液中，尖
缔合	3250～3000	3.08～3.33	v	在溶液中，宽和浓度与溶剂有关
邻位取代 OH-C₆H₄-X，X = —C(=O)—，—NO₂，	3200～2500	3.13～4.00	m	分子内氢键

表 19-25 酚 O—H 变形和 C—O 伸缩振动

官能团	σ/cm⁻¹	λ/μm	强度	官能团	σ/cm⁻¹	λ/μm	强度
缔合	1390～1330	7.19～7.52	m		1175～1150	8.51～8.70	s
	1260～1180	7.94～8.48	s	间烷基酚（溶液）	1285～1270	7.78～7.87	s
游离（稀溶液）	1360～1300	7.35～7.69	m		1190～1180	8.40～8.48	s
	1225～1150	8.17～8.70	s		1160～1150	8.62～8.70	s
邻烷基酚（溶液）	≈1320	≈7.58	s	对烷基酚（溶液）	1260～1245	7.94～8.03	s
	1255～1240	7.97～8.07	s		1175～1165	8.51～8.58	s

表 19-26 酚的其他谱带

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
酚	≈1660	≈6.02	s	通常呈双峰，为芳环的 C═C 伸缩
	≈1110	～9.01	v	芳环，C—H 变形
	720～600	13.89～16.67	s	宽，O—H 面外弯曲（氢键）
	450～375	22.22～26.67	w	芳环 C—OH 键的面内弯曲

（五）醚和过氧化物

表 19-27 醚 C—O 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
饱和脂肪醚	1150～1060	8.70～9.43	vs	不对称 C—O 伸缩
C—O—C	1140～900	8.77～11.11	v	对称 C—O 伸缩
烷基芳基醚 ═C—O—C	1270～1230	7.87～8.13	vs	不对称 ═C—O 伸缩
	1120～1020	8.93～9.80	s	对称 C—O 伸缩
乙烯基醚 CH_2═CH—O—	1225～1200	8.16～8.33	s	不对称 C—O 伸缩 ≈1205cm⁻¹
氧杂环丁烷	≈1030	≈9.71	w	对称 C—O 伸缩
（四元环）	980～970	10.20～10.31	s	
Ar—O—CH_2—O—Ar	1265～1225	7.91～8.17	s	═C—O 伸缩
	1050～1025	9.52～9.76	s	
环醚	1270～1030	7.87～9.71	s	
无环二芳基醚 ═C—O—C═	1250～1170	8.00～8.55	s	
环 ═C—O—C═	1200～1120	8.33～8.93	s	
	1100～1050	9.09～8.70	s	
环氧化合物：环氧衍生物 >C—C< (O 桥)	1260～1240	7.94～8.07	m-s	C—O
单取代环氧化物 —CH—CH_2 (O 桥)	880～805	11.36～12.42	m	环振动

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
反式环氧衍生物	950~860	10.53~11.63	v	环振动
顺式-环氧衍生物	865~785	11.56~12.74	m	环振动
三取代环氧衍生物	770~750	12.99~13.33	m	环振动
缩酮和乙缩醛	1190~1140	8.40~8.77	s	C—O—C—O—C 振动
	1195~1125	8.37~8.89	s	C—O—C—O—C 振动
	1100~1060	9.09~9.43	s	C—O—C—O—C 振动强带
	1060~1035	9.43~9.65	s	C—O—C—O—C 振动有时能见到
乙缩醛	1115~1105	8.96~9.02	s	C—H 变形
	915~895	10.93~11.17	s	
	1265~1235	7.90~8.10	s	

表 19-28 过氧化物的伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
过氧化物	900~830	11.11~12.05	w	C—O 伸缩
烷基过氧化物	1150~1030	8.70~9.71	m-s	C—O 伸缩
芳基过氧化物	≈1000	≈10.00	m	C—O 伸缩
过酸	≈3450	≈2.90	m	O—H 伸缩
G.CO.OO.H	1785~1755	5.60~5.70	vs	C=O 伸缩
	≈1175	≈8.51	m-s	C—O 伸缩
脂肪族二酰基过氧化物	1820~1780	5.50~5.62	vs	C=O 伸缩
—CO—OO—CO—	1300~1050	7.69~9.52	m-s	C—O 伸缩（两个带）

表 19-30　胺 N—H 变形振动

官　能　团	范　围		强度	备　注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
伯胺	1650～1580	6.06～6.33	m-s	芳香族伯胺在频率范围的低端
	900～650	11.11～15.40	s	宽，N—H 面外弯曲通常是多重谱带
脂肪族伯胺	850～810	11.76～12.35	m-s	
$R—CH_2NH_2$ 和 $R_1R_2R_3CNH_2$	795～760	12.58～13.10	m	
脂肪族伯胺	≈830	≈12.05	s	
$R_1R_2CHNH_2$	≈795	≈12.58	s	
仲胺	1580～1490	6.33～6.71	w	可能被在 $1580cm^{-1}$ 的芳香谱带掩蔽
	750～700	13.33～14.29	s	宽，N—H 非平面摇摆
脂肪族仲胺 $R_1—CH_2—NH—CH_2—R_2$				
和 $R_1R_2R_3C—NH—CR_4R_5R_6$	750～710	13.33～14.08	s	
$R_1R_2CH—NH—RHR_3R_4$	735～700	13.61～14.29	s	
亚胺 >C=N—H	1590～1500	6.29～6.67	m	N—H 弯曲

表 19-31　胺 C—N 伸缩振动

官　能　团	范　围		强度	官　能　团	范　围		强度
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$			σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$	
脂肪族伯胺	1090～1020	9.17～9.80	w-m	脂肪族叔胺	1230～1030	8.13～9.71	m①
脂肪族伯胺	1090～1065	9.17～9.39	m	脂肪族叔胺	1210～1150	8.25～8.70	m
$—CH_2—NH_2$				$(—CH_2)_3N$	1100～1030	9.10～9.70	m
脂肪族伯胺	1140～1080	8.77～9.26	w-m				
$>CH—NH_2$	1045～1035	9.57～9.66	w				
脂肪族伯胺	1240～1170	8.07～8.55	w-m	脂肪族叔胺	≈1270	≈7.87	m
$\rightarrow CNH_2$	1040～1020	9.62～9.80	w	$(CH_3)_2N—CH_2—$	≈1190	≈8.40	m
脂肪族仲胺	1190～1170	8.40～8.55	m		≈1040	≈9.62	m
	1145～1130	8.73～8.85	m	脂肪族叔胺	≈1205	≈8.30	m
脂肪族仲胺	1145～1130	8.73～8.85	m-s	$(C_2H_5)_2N—C\leftarrow$	≈1070	≈9.35	m
$—CH_2—NH—CH_2—$				芳香族伯和仲胺	1360～1250	7.36～8.00	s②
脂肪族仲胺	1190～1170	8.40～8.55	m	芳香族叔胺 $N\leftarrow$	1380～1330	7.25～7.52	s
$>CH—NH—CH<$				亚胺，>C=N—	1690～1640	5.92～6.10	v③

①双峰。②灵敏带。③ C=N 伸缩。

表 19-32　胺的其他振动

官　能　团	范　围		强度	备　注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
$>N—CH_3$ 和 $>N—CH_2$	2820～2760	3.55～3.62	m-s	C—H 伸缩
$CH_3—N<$	1370～1310	7.30～7.64	m	
脂肪族伯胺	495～445	20.20～22.47	m-s	宽
	≈290	≈34.48	s	宽
芳香族伯胺	445～345	22.47～28.99	w	芳香 $—NH_2$ 面内变形
脂肪族仲胺	455～405	21.98～24.69	w-m	C—N—C 变形
脂肪族叔胺	510～480	19.61～20.83	s	
>C=C(—)—N<	1680～1630	5.95～6.14	m-s	C=C 伸缩，比正常的 C=C 伸缩振动谱带强

表 19-33　胺和亚胺氢卤化物 N—H⁺ 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	λ/μm		
$—NH_3^+$	3350～3100	2.99～3.23	m	宽，固相光谱
$>NH_2^+$，$\rightarrow NH^+$，$>C=NH^+—$	2700～2250	3.70～4.44	m	宽，有时为一组尖谱带，固相光谱
$—NH_3^+$	≈3380	≈2.96	m	不对称伸缩，稀溶液光谱
	≈3280	≈3.05	m	对称伸缩，稀溶液光谱
$>NH_2^+$	3000～2700	3.33～3.70	m-s	稀溶液光谱，两个谱带
$\rightarrow NH^+$	2200～1800	4.55～5.56	w-m	稀溶液光谱
$>C=NH^+—$	2700～2330	3.70～4.29	m-s	稀溶液光谱，倍频带出现在(2500～2300)cm^{-1}
铵盐 NH_4^+	3300～3030	3.03～3.30	s	宽

表 19-34　胺和亚胺氢卤化物 N—H⁺ 变形振动和其他振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	λ/μm		
$—NH_3^+$	≈2500	≈4.00	w	倍频(有时不存在)
	≈2000	≈5.00	w	倍频(有时不存在)
	1625～1560	6.15～6.41	m	不对称 NH_3^+ 变形
	1550～1500	6.45～6.67	m	对称 NH_3^+ 变形
	～800	≈12.50	w	NH_3^+ 平面摇摆
$>NH_2^+$	≈2000	≈5.00	w	倍频(有时不存在)
	1620～1560	6.17～6.41	m-s	
	≈800	≈12.50	w	NH_2^+ 平面摇摆
亚胺，$>C=N^+—H$	2200～1800	4.55～5.56	m	一个或几个谱带
	≈1680	≈5.95		C═N⁺ 伸缩
铵盐 NH_4^+	1430～1390	6.99～7.19	s	N—H 变形

（七）羰基化合物

1. 酮

表 19-35　酮的振动吸收

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	λ/μm		
饱和脂肪酮 $—CH_2—C(=O)—CH_2—$	1725～1705	5.80～5.87	s	$\nu_{C=O}$，该振动频率还与邻接碳原子的结构有关 $CH_3—C(=O)—CH_3$　1720cm^{-1} $CH_3—C(=O)—CH(CH_3)_2$　1718cm^{-1} $(CH_3)_2CH—C(=O)—CH(CH_3)_2$　1709cm^{-1} tBu—C(=O)—tBu　1697cm^{-1} $C_2H_5—C(C_2H_5)_2—C(=O)—C(CH_3)_2—tBu$　1674cm^{-1}

续表

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
	1225～1075 (1至数个吸收带)	8.16～9.30		C—C(=O)—C 中 C—C—C 的变角振动与 C—C 伸缩振动
	3450		w	尖锐弱吸收，$\nu_{C=O}$倍频，有时没有
共轭酮				
C=C—C(=O)—	1685～1660	5.93～6.02	s	$\nu_{C=O}$，在(1650～1600)cm⁻¹处还可以清楚地看到 C=C 伸缩振动吸收带，共轭使其强度增加
Ar—C(=O)—	1700～1680	5.88～5.95	s	$\nu_{C=O}$，强，其吸收位置受到苯核取代基电效应和空间效应的影响
	1325～1215 (1至几个吸收带)	7.55～8.23		—C—C(=O)—C— 变角振动和 C—C 伸缩振动
C=C—C=C—C(=O)；C=C—C(=O)—C=C；Ar—C(=O)—Ar	1670～1660	5.99～6.02	s	强，$\nu_{C=C}$共轭使 $\nu_{C=O}$向低频位移
△—C(=O)—R	1690	5.92	s	环丙烷中心的高电子密度使它的性质类似于烯类双键
邻位取代苯—C(=O)—R（邻位 X），X=OH，NH_2	1655～1635	6.04～6.12	s	$\nu_{C=O}$，邻位基团形成螯合氢键后，移向低频
环酮				$\nu_{C=O}$，强，随着环张力增加，$\nu_{C=O}$向高频位移
七元环酮	1705	5.87	s	
六元环酮	1715	5.83	s	
五元环酮	1745	5.73	s	
四元环酮	1780	5.62	s	
三元环酮	1815	5.51	s	
卤代酮				
—C(X)—C(=O)—	位移 0～+25			取决于卤原子的电负性 —Cl：0～+25cm⁻¹　—Br：0～+20cm⁻¹ —I：0～+10cm⁻¹ 在溶液中测定光谱时，C=O 伸缩振动受卤素(如氯)空间场效应的影响，出现双峰，顺式比旁式高约 20cm⁻¹
—CX_2—C(=O)—	位移 0～+45			双峰(异构体)
—CX—C(=O)—CX—				三重峰(异构体)
二酮				
α-二酮 —C(=O)—C(=O)—	1720±10	5.81±0.03	s	
β-二酮 —C(=O)—CH_2—C(=O)—	1755～1695	5.70～5.90	s	接近 1720cm⁻¹，有时为双峰，形成六元环螯合氢键后，1615cm⁻¹和 1605cm⁻¹，宽强吸收带

续表

官 能 团	范 围		强度	备 注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
醌				
1,4 或 1,2 苯醌	1690～1660	5.72～6.02	s	强，通常在 $1675cm^{-1}$，1 至 2 个吸收带
其他醌类	1655～1635	6.04～6.12	s	
O=C—C_6H_4—OH(NH_2)（邻位）	1630	6.13	s	

2. 醛

表 19-36 醛的振动吸收

官 能 团	范 围		强度	备 注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
脂肪醛				
$—CH_2CHO$	1735～1715	5.76～5.83	s	通常在 $1725cm^{-1}$，其他特征吸收带为 $2820cm^{-1}$ 和 $2720cm^{-1}$，弱而尖锐，$2720cm^{-1}$ 吸收带特征性很强，是鉴定醛基最有用的吸收带
α,β-不饱和醛 C═C—CHO	1705～1680	5.87～5.95	s	
α,β,γ,δ 不饱和醛 —C═C—CHO	1685～1660	5.93～6.02	s	共轭使 $\nu_{C=O}$ 频率下降，强度增加，共轭的双键越多，$\nu_{C=O}$ 频率下降越多，但下降的幅度逐渐减小
芳香醛				
ArCHO	1715～1695	5.83～5.90	s	苯环共轭不如双键共轭影响大，苯环上有吸电子基团时，$\nu_{C=O}$ 频率升高，推电子基团使 $\nu_{C=O}$ 频率下降
卤代醛				
$ClCH_2CHO$	1748	5.72	s	*α*-位存在电负性基团时，由于诱导效应使 $\nu_{C=O}$ 频率升高，电负性越强，频率升高越多
Cl_2CHCHO	1742	5.74	s	
Cl_3CHCHO	1762	5.68	s	
α,β 不饱和 *β*-羟基醛 C═C—CHO（C 上连 OH）	1670～1645	5.99～6.08	s	羟基与醛基形成六元环螯合氢键

3. 羧酸和羧酸盐

表 19-37 羧酸的红外特征频率

官 能 团	范 围		强度	备 注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
—COOH 中 OH 伸缩振动	3560～3500(单体)	2.81～2.86	m-w	气态或非极性稀溶液中，以单体形式存在
	3000～2500(二聚体)	3.33～4.00	m	一组非常特征的宽吸收带，其主峰在 $3000cm^{-1}$，低频一侧存在许多小的副峰，副峰中最强的在 $2650cm^{-1}$，高频一侧的吸收是由强烈缔合的 OH 伸缩振动产生的。其他部分是由 ν_{C-O} 和 δ_{OH} 的合频与 ν_{OH} 的基频之间发生费米共振产生的
—COOH 中 C═O 伸缩振动：				
饱和脂肪族羧酸	1800～1740(单体)	5.56～5.75	s	$\nu_{C=O}$，其强度比酮强，除几个最低级的二元酸（单酸，丙二酸、丁二酸）外，二元酸的 $\nu_{C=O}$ 频率在正常位置
	1725～1700(二聚体)	5.80～5.88	s	
芳香族羧酸	1700～1680(二聚体)	5.88～5.95	s	与酮相反，芳香环与 C═O 共轭比 *α,β* 不饱和共轭影响大
α,β-不饱和脂肪族羧酸	1715～1690(二聚体)	5.83～5.92	s	
α-卤代羧酸	1740～1720(二聚体)	5.75～5.81	s	*α*-Br 和 *α*-Cl 位移（+10～+20）cm^{-1}，*α*-F 位移 $+50cm^{-1}$
分子内氢键羧酸	1680～1650	5.95～6.06	s	由于分子内形成螯合氢键 $\nu_{C=O}$ 向低频位移更大

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
α-不饱和二元羧酸	1700～1685	5.88～5.93	s	
过氧酸 —CO—OOH	1760～1730	5.68～5.78	s	大多数 $1748cm^{-1}$
α,β 和 γ-酮酸	≈1745	5.73	s	α-酮酸，可视作双酮
	1754～1727	5.70～5.79	s	β-酮酸，羧酸的羟基易同 β 位上酮基构成氢键，使 $\nu_{C=O}$上升
	≈1800	5.56	s	γ-酮酸，形成羟基内酯，出现内酯的 $\nu_{C=O}$
—COSH，硫代酸	1700～1690	5.88～5.92	s	
—COOH 中 OH 平面变角振动	1410	7.09	w	OH 平面变角振动与 C—O 伸缩振动偶合
—COOH 中 C—O 伸缩振动	1300～1200	7.69～8.33	m-s	
—COOH 中 OH 非平面变角振动	940～900	10.63～11.11	m	宽
固体结晶长链饱和脂肪酸中反式构象排列的$\leftarrow CH_2 \rightarrow$，平面摇摆振动	1330～1180	7.52～8.74	m	由(1330～1180)cm^{-1}区域吸收带数目可推断饱和脂肪酸的链长，亚甲基数目 n 与吸收带数目 m 有如下关系： 当 n 为偶数时，$m=\frac{n}{2}$；当 n 为奇数时，$m=\frac{n+1}{2}$

表 19-38　羧酸盐的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
$—COO^-$	1610～1550	6.21～6.45	vs	$\nu_{as}(COO^-)$
	1420～1400	7.04～7.14	s	$\nu_s(COO^-)$此外在 $694cm^{-1}$有一弱吸收属于 COO^-非平面变角，COO^-伸缩振动频率与吸收带形状与金属离子有关
$—CF_2COO^-$	1695～1615	5.90～6.19	s	
$—CO—S^-$	≈1525	≈6.56	s	COS^-伸缩振动
$R—O—CO—S^-$	≈1580	≈6.33	s	COS^-伸缩振动
α-卤代羧酸盐	1625～1560	6.15～6.41	s	氟代羧酸盐在吸收频率范围的高端
$—CCl_2COO^-$	1680～1640	5.95～6.10	s	

4. 酯和内酯

表 19-39　酯和内酯的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
饱和脂肪酸酯	1750～1720	5.71～5.81	vs	$\nu_{C=O}$，甲酸酯例外
	1275～1185	7.84～8.44	vs	ν_{as}(C—O—C)强度高，形状宽，对于不同的酯，是十分稳定的。HCOOR(1200～1180)cm^{-1}；CH_3COOR(1265～1230)cm^{-1}；CH_3CH_2COOR $1190cm^{-1}$ RCOOR(长链酸酯 $1170cm^{-1}$)
	1060～1000	9.43～10.00	s	ν_s(C—O—C)强度较低，—COOR (乙酯或大于乙酯) $1030cm^{-1}$，$—COOCH_3$ $1015cm^{-1}$
甲酸酯	1725～1720	5.80～5.81	vs	$\nu_{C=O}$
乙酸酯	1750～1740	5.71～5.75	vs	$\nu_{C=O}$
不饱和脂肪酸酯	1730～1715	5.78～5.83	s	不饱和双键与羰基共轭，$\nu_{C=O}$向低频方向位移，ν_{as}(C—O—C)向高频方向位移，当高于 $1250cm^{-1}$，可以认为 C═O 与双键或苯环共轭
$C{=}C{-}C({=}O){-}OR$	1720	5.81	s	$\nu_{C=O}$，ν_{as}(C—O—C)在(1300～1250)cm^{-1}，ν_s(C—O—C)在(1200～1050)cm^{-1}

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
Ar—C(=O)—OR	1720	5.81	s	$\nu_{C=O}$，ν_{as}(C—O—C)在(1300～1250)cm^{-1}特强，ν_s(C—O—C)在(1180～1100)cm^{-1}
Ar—C(=O)—O—Ar	1740～1730	5.75～5.78	s	$\nu_{C=O}$ 邻位取代苯甲酸酯(1265～1250)cm^{-1}，肩峰在大约1300cm^{-1} (1120～1070)cm^{-1} 间位取代苯甲酸酯(1295～1280)cm^{-1}，肩峰在大约1305cm^{-1} (1135～1105)cm^{-1} 对位取代苯甲酸酯≈1310，≈1275(很强的双峰)，1180，(1120～1100)cm^{-1}
o-X-C$_6$H$_4$—C(=O)—OR X=OH，NH_2	1690～1670	5.92～5.99	s	$\nu_{C=O}$，由于形成分子内螯合氢键，向低频位移
—C(=O)—C(=O)—OR 或 (O=)C(—OR)—C(—OR)(=O)	1755～1740	5.70～5.75	s	$\nu_{C=O}$
β-酮酯 —C(=O)—CH_2—C(=O)—OR ⇌	1740～1710	5.75～5.85	s	两个吸收带，分别为酯和酮羰基的伸缩振动
—C(OH)=C—C(=O)—OR(烯醇式)	1650	6.06	s	$\nu_{C=O}$，$\nu_{C=C}$在1630cm^{-1}附近
X—CH_2—C(=O)—OR X=卤素，	1770～1745	5.65～5.73	s	羰基α位有吸电子基团时，$\nu_{C=O}$向高频移动，位移量与电负性和吸电子基团数目有关。
X =N≡C	1755～1750	5.70～5.71	s	
—CF_2COO—	1800～1775	5.56～5.63	vs	
内酯				
四元环内酯(β-内酯)	1840～1815	5.43～5.51	s	$\nu_{C=O}$
五元环内酯(γ-内酯)	1790～1770	5.59～5.65	s	$\nu_{C=O}$
六元环内酯(δ-内酯)	1750～1735	5.71～5.76	s	$\nu_{C=O}$
α,β-不饱和γ-内酯	1790～1775 1765～1740	5.59～5.63 5.67～5.75	s s	$\nu_{C=O}$ $\nu_{C=O}$ } 因费米共振出现双峰
β,γ-不饱和γ-内酯	1815～1785	5.51～5.60	s	$\nu_{C=O}$
α,β-不饱和δ-内酯	1745～1730	5.73～5.78	s	$\nu_{C=O}$
α,β-,γ,δ-不饱和δ-内酯	1775～1740 1740～1715	5.63～5.75 5.75～5.83	s s	$\nu_{C=O}$ $\nu_{C=O}$ } 因费米共振出现双峰
苯并呋喃酮(3-Ar，3-R)	1820～1800	5.49～5.56	s	$\nu_{C=O}$

续表

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
(2-苯并[c]呋喃酮结构)	1775~1710	5.63~5.85	s	$\nu_{C=O}$
	1290~1280 1120~1100 1020~1010 515~490 490~470	7.75~7.81 8.93~9.09 9.80~9.90 19.42~20.40 20.40~21.27	m-s m-s w-m w-m w-m	特征的 2-苯并[c]呋喃酮环的振动
内酯	1370~1160	7.30~8.62	s	ν_{C-O}
烷基碳酸酯 —O—C(=O)—O—	1760~1740	5.68~5.75	s	$\nu_{C=O}$,ν_{C-O-C}在 1250cm⁻¹和 1000cm⁻¹
烷基芳基碳酸酯	1790~1755	5.59~5.70	s	$\nu_{C=O}$
双芳基碳酸酯	1820~1775	5.49~5.63	s	$\nu_{C=O}$
五元环碳酸酯	1860~1750	5.38~5.71	s	$\nu_{C=O}$环上有卤素取代向高频移动
—C=C—O—C(=O)—O—C=C—	1770	5.65	s	$\nu_{C=O}$,ν_{C-O-C}在 1250cm⁻¹和 1160cm⁻¹
乙烯酯和酚酯 C(=O)—O—C=C (环状结构) R—C(=O)—O—C₆H₅	1780~1760	5.62~5.68	s	$\nu_{C=O}$,$\nu_{C=C}$在 1685cm⁻¹
过氧酯 —C(=O)—O—O—R	1770	5.65	s	$\nu_{C=O}$

5. 酰卤

表 19-40 酰卤的振动吸收

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
R—C(=O)—X	1815~1770	5.51~5.65	vs	该吸收位置对 —C(=O)—Cl 而言,常在 1800cm⁻¹,有时分裂,有些酰氯在(1750~1700)cm⁻¹还有一弱吸收,ν_{C-X}在(1000~910)cm⁻¹,δ_{C-X}在 645cm⁻¹
C=C—C(=O)—X 或 C₆H₅—C(=O)—X	1780~1750	5.62~5.71	vs	该吸收位置是对酰氯而言,对于酰氟在更高的频率吸收,酰溴或酰碘在稍低的频率吸收

6. 酸酐

表 19-41　酸酐的红外特征频率

官能团	范围 σ/cm^{-1}	范围 λ/μm	强度	备注
开链脂肪族酸酐	1860～1800	5.38～5.56	s	分别为 $\nu_{as}(C=O)$ 和 $\nu_s(C=O)$；通常在 1820cm^{-1} 和 1760cm^{-1}，$\Delta\nu_{C=O}$=60cm^{-1}，高频吸收带强，此外 C—O—C 伸缩振动在(1175～1050)cm^{-1}，有 1～2 条吸收带，强
R—C(=O)—O—C(=O)—R	1800～1740	5.56～5.75	s	
芳香酸酐和 α,β-不饱和酸酐	1830～1780	5.46～5.62	s	较相应的饱和酸酐低(20～40)cm^{-1}，丙烯酸酐或苯甲酸酐分别为 1785cm^{-1} 和 1725cm^{-1}
	1755～1710	5.70～5.85	s	
环状酸酐				随着环张力增加，$\nu_{C=O}$ 频率向高频位移，具有张力环的 C—O—C 伸缩振动频率在(1300～1200)cm^{-1}，此外，六元环酸酐在(1100～1000)cm^{-1} 有一分裂吸收，五元环酸酐，无论是脂肪族或芳香族的，均在 910cm^{-1} 有一宽强吸收
六元环(饱和)	1820～1780	5.49～5.62	s	
	1780～1740	5.62～5.75	s	
五元环(饱和)	1870～1820	5.35～5.49	s	
	1800～1755	5.56～5.70	s	
α,β-不饱和五元环酸酐	1860～1850	5.38～5.41	s	
	1780～1760	5.62～5.68	s	
α-卤代酸酐				
Cl	2 个 C=O +30	—	—	
F	2 个 C=O +60			
过氧酸酐				
R—C(=O)—O—O—C(=O)—R	1820～1810	5.49～5.52	s	高频吸收带弱
	1800～1760	5.56～5.68	vs	低频吸收带强
Ar—C(=O)—O—O—C(=O)—Ar	1800～1780	5.56～5.62	s	
	1780～1760	5.62～5.68	vs	
顺丁烯二酸酐	1850～1790	5.41～5.59		高频吸收带强度弱，低频吸收带强，且分裂成双峰，在不同溶剂中强度可相反
邻苯二甲酸酐	1850 和 1770	5.41 和 5.65	—	1770cm^{-1} 吸收带分裂为双峰，同时还有(1300～1200)cm^{-1} 和 910cm^{-1} 吸收带，910cm^{-1} 吸收带是五元环酸酐特征
丙烯酸酐或苯甲酸酐	1785	5.60	—	
	1725	5.80		

7. 酰胺

表 19-42　酰胺的振动吸收

振动基团	振动频率 σ/cm^{-1} 游离态	缔合态	强度	注释
—CONH$_2$				
ν(NH)	3500 和 3400	3350 和 3180	中	$\nu_{as}(NH_2)$ 和 $\nu_s(NH_2)$，强度相近，间距大于 120cm^{-1}(缔合态)
ν(C=O)	1690	1650	强	酰胺吸收带 Ⅰ
δ(NH$_2$)	1620～1590	1650～1610	强	酰胺吸收带 Ⅱ，δ(NH$_2$) 与 ν(C—N) 偶合
ν(C—N)	1430～1400	1430～1400	中～弱	酰胺吸收带 Ⅲ，ν(C—N) 与 δ(NH$_2$) 偶合
γ(NH)	700	700		酰胺吸收带 Ⅳ

续表

振动基团	振动频率 σ/cm^{-1}		强度	注释
	游离态	缔合态		
—CONH—				仲酰胺中 C═O 与 NH 可以分别位于分子链的同侧或异侧，因而有顺式和反式之别，顺式比反式频率低，由于含量不同，两峰强度可能相差较大。
ν_{NH}	3500～3400	3320～3060	—	
反式	3460～3400	3320～3070	中	
顺式	3440～3420	3180～3140	中	
顺式和反式	3100～3070	3100～3070	—	NH_2 平面变角振动的倍频
$\nu_{C═O}$	1700～1670	1680～1630	强	酰胺吸收带 I，当 N 上有吸电子取代基时，$\nu_{C═O}$频率向高频位移
δ_{NH}				
链状	1550～1510	1570～1510	—	酰胺吸收带 I
环状	1430	1430		
ν_{C-N}	1260	1335～1200	—	酰胺吸收带 Ⅲ
γ_{NH}	700	700		酰胺吸收带 Ⅳ
—CON<				
$\nu_{C═O}$	1670～1630	1670～1630	强	酰胺吸收带 I，因无氢键缔合，不受相态的影响，这点和伯、仲酰胺不同
内酰胺 C═O [NHC(═O)(CH₂)ₙ 环]				
$n=4$	1680			
$n=3$	1710～1700	在溶液中	—	环张力增加，$\nu_{C═O}$向高频位移
$n=2$	1760～1730			
酰亚胺 C═O				
开链		1790～1720 1710～1670	—	
环状		1790～1735 1745～1680	—	
脲的 C═O		1670～1650	—	
氨基甲酸酯的 C═O		1740～1690	—	

8. 氨基酸

表 19-43　氨基酸的振动吸收

化合物	振动方式	振动频率 σ/cm^{-1}	注释
氨基酸			
$NH_3^+(CH_2)_nCOO^-$	$\nu_{as}(NH_3^+)$	3130～3030，宽强	3100～2000cm^{-1}很宽的一组吸收带，主峰在 3000cm^{-1}，低频为弱吸收峰
$RNH_2^+(CH_2)_nCOO^-$	$\nu_{as}(NH_2^+)$	3000～2750	
$R_1R_2NH^+(CH_2)_nCOO^-$	$\nu_{as}(NH^+)$	2700	
	$\nu_s(NH_3^+, NH_2^+, NH^+)$	2760～2530	
	$\delta_{as}(NH_3^+)$	1660～1590	氨基酸吸收带 I
	$\delta_s(NH_3^+)$	1550～1480	氨基酸吸收带 Ⅱ，如将氨基酸与碱反应，可用于区别 COO^- 基团的吸收
	$\nu_{as}(COO^-)$	1600～1560	强吸收带
	$\nu_s(COO^-)$	1470～1370	弱，且不特征
氨基酸盐酸盐			
$NH_3^+(CH_2)_nCOOH \cdot Cl$	$\nu_{as}(NH_3^+)$	3130～3030	宽强吸收带，与 COOH 吸收带重叠
	$\nu_s(NH_3^+)+2\nu(C═O)$	3030～2500	宽，强吸收带
		2000	弱吸收带

续表

化合物	振动方式	振动频率 σ/cm^{-1}	注释
	$\delta_{as}(NH_3^+)$	1660～1590	
	$\delta_s(NH_3^+)$	1550～1480	
	$\nu(C=O)$	1755～1700	
	$\nu(C-O)$	1220～1190	
氨基酸金属盐 $NH_2(CH_2)_nCOO^- \cdot Na^+$	$\nu(NH_2)$	3500～3200	双峰
	$\nu_{as}(COO^-)$	1600～1560	
	$\nu_s(COO^-)$	1420～1300	

1900 1800 1700

X—C—CO—O—CO—C—X
al—CO—O—CO—al
ar—O—CO—O—ar
ar—CO—O—CO—ar
ar—O—CO—X
X—C—COOH 二聚体
al—O—CO—X
X_2C—COO—al
C=C—CO—X
X—C—CO—al
al—CO—O—CO—al
al—COO—al
CO—C—C—COO—al(酯)
al—O—CO—NH—al
al—CHO
al—CO—CO—al
al—O—CO—S—ar
al—COOH 二聚体

常为2个带
3个带
常为2个带

X—C—CO—O—CO—C—X
COOH
al—CO—X
ar—CO—X
al—O—CO—O—ar
al—CO—O—C=C
CO—C—C—COO—al 拟酯
al—COO—ar
X—COO—al
*N—C—COOH
CO—C=C—COO—al (拟酯)
NH—CO—X
al—O—CO—O—al
ar—O—CO—S—al
O—CO—NH—
CO—COO—al
ar—CO—O—CO—ar

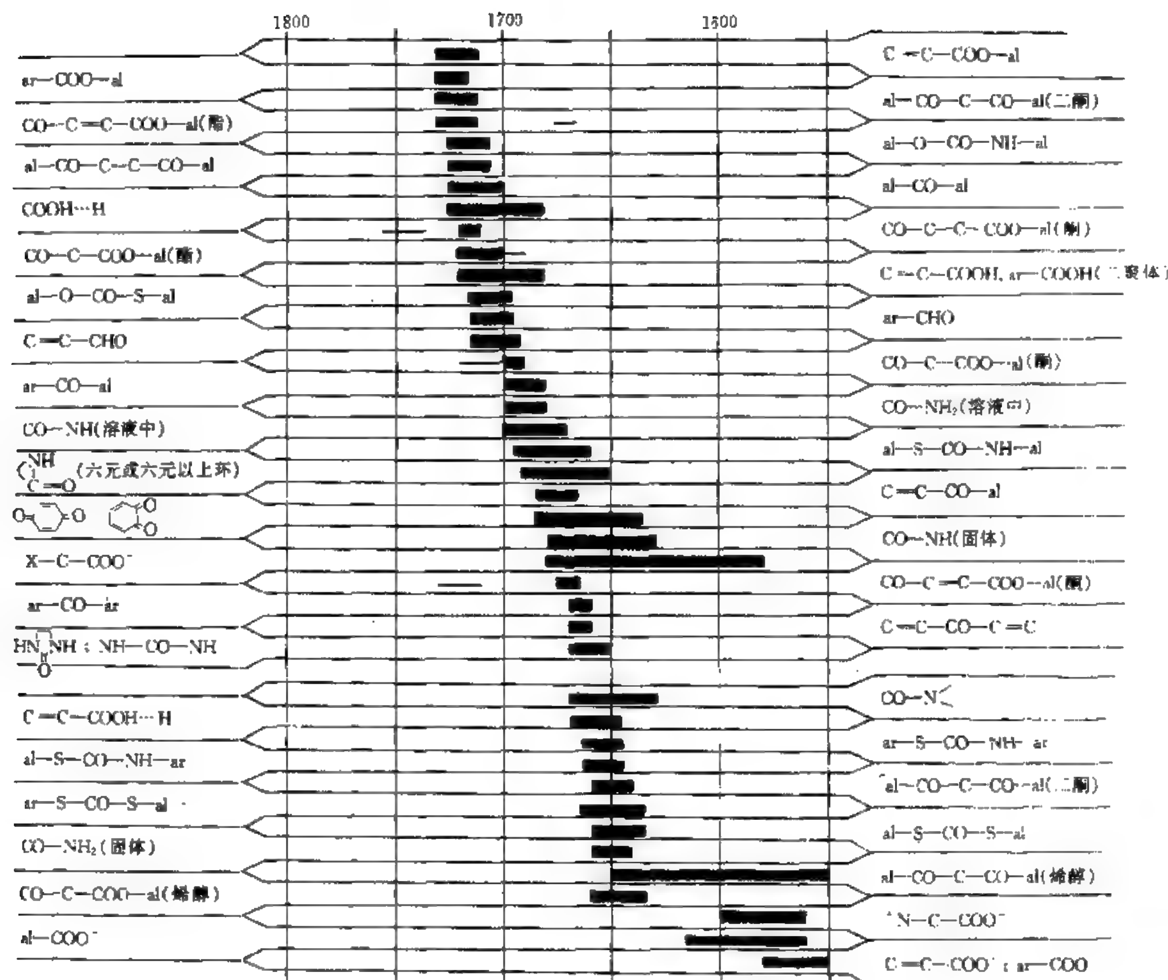


图 19-2　羰基红外吸收谱带汇总

X—任何取代基；al—烷基；ar—芳基

（八）硝基、亚硝基化合物

表 19-44　硝基化合物的红外特征频率

官能团	范围 σ/cm^{-1}	范围 $\lambda/\mu m$	强度
—C—NO₂	1575～1500①	6.35～6.67①	s
	1380～1300②	7.25～7.69②	s
	920～830③	10.87～12.05③	
脂肪族：R—NO₂	1565～1530	6.39～6.54	s
	1380～1340	7.25～7.46	s
α-电负性取代 R—C(R)(X)—NO₂	1580～1570	6.33～6.37	s
	1360～1340	7.35～7.46	s
R—C(X)(X)—NO₂	1600～1570	6.25～6.37	s
	1337～1327	7.48～7.54	s

官能团	范围 σ/cm^{-1}	范围 $\lambda/\mu m$	强度
X—C(X)—NO₂	1625～1595	6.15～6.27	s
	1315～1305	7.60～7.66	s
C(X)=C—NO₂	1530～1510	6.54～6.62	s
	1355～1335	7.38～7.49	s
ArNO₂④	1550～1500	6.45～6.67	s
	1365～1335	7.33～7.49	s
R—O—NO₂⑤	1650～1600	6.06～6.25	s
	1300～1250	7.69～8.00	s
R—N—NO₂	1630～1530	6.13～6.54	s
	1312～1250	7.62～8.00	s

①NO_2 不对称伸缩振动，②NO_2 对称伸缩振动。③C—N 伸缩。④ν_{C-N}在(870～840)cm^{-1}。⑤ν_{O-N}在(870～855)cm^{-1}。

表 19-45　亚硝基化合物、亚硝酸酯和亚硝基胺 N═O 伸缩振动

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
脂肪族 R—N═O	≈1600	≈6.25		游离态
芳香族 Ar—N═O	1500	6.67		游离态
脂肪族 R—N—O （反式）	1290～1190	7.75～8.40		固态或液态（二聚体）
和芳香族 Ar—N—O （顺式）	1425～1380	7.02～7.25		
C—O—N═O	1680～1610	5.95～6.21		高频（1680～1650cm⁻¹）吸收带属于反式 R O N O；低频（1625～1605cm⁻¹）吸收带属于顺式 O—N R O
R—N—N═O	1500～1430	6.67～6.99		吸收频率低于其他 N═O 伸缩振动

（九）含硫化合物

表 19-46　含硫化合物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
硫醇-SH	2600～2500	3.85～4.00	w	游离 ν_{SH} 吸收峰位置偏于高波数，多数在 2590cm⁻¹左右，在浓溶液中移至 2574cm⁻¹，芳香硫醇的峰比脂肪硫醇的强
	≈5000	2.00		SH 伸缩振动倍频
	2700～2630	3.70～3.80		CH_2S 基频（δ_{CH_2-S}）的倍频，一般在长链化合物中出现较多
	1420～1450	7.04～6.90	m	硫基同 CH_2 相连的面外摇摆
二硫化合物				
直链 R—S—S—R′	525～510	19.04～19.60	w	S—S 伸缩振动在（525～510）cm⁻¹两个弱峰
⬡—S—S—⬡	510	19.60		
分叉 —C—S—S—C—	>545	18.34	w	
芳香 Ar—S—S—Ar	540～520	18.52～19.23		
硫羰基化合物				
R—CS—R′	≈1150	≈8.70	s	C═S 伸缩
Ar—CS—Ar	1225～1140	8.16～8.30	w-m	C═S 伸缩
α，β-不饱和硫酮	1155～1140	8.66～8.77	s	C═S 伸缩
$(RS)_2C$═S	1060～1050	9.43～9.52	s	C═S 伸缩
	≈850	≈11.76	s	不对称 S—C—S 伸缩
	≈700	≈14.29	w-m	
	≈500	≈20.00	w-m	2 个谱带，S—C—S 对称伸缩和 C—S 面外变形
$(RO)_2C$═S	1235～1210	8.10～8.26	s	C═S 伸缩
R—CS—SH	≈1220	≈8.20	s	C═S 伸缩
R—CS—SR	1225～1185	8.16～8.44	s	C═S 伸缩
	≈870	≈11.49	m-s	不对称 CS—S 伸缩
黄原酸酯 RO—C(═S)—SR	1200～1100	8.33～9.09	m-s	至少 2 个谱带
	1060～1040	9.43～9.62	vs	C═S 伸缩
R—O—CS—S⁻	1100～1000	9.10～10.00	s	在（1250～1030）cm⁻¹范围内有 3 个强带
硫脲，缩氨基硫脲	1570～1395	6.37～7.71	s	
>N—C═S	1420～1260	7.04～7.94	v	宽 由于 C═S 和 C—N 振动之间强烈偶合的结果
	1140～940	8.77～10.64	v	
	850～680	11.78～14.70		

续表

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
硫代酰胺 $R-C(=S)-NH_2$	1300～1100	7.69～9.09	w	C═S 伸缩
亚砜				
R—SO—R 或 Ar—SO—Ar	1060～1040	9.43～9.62	s	SO 伸缩，强宽吸收带，形成氢键向低频位移，当与卤素或氧相接时，向高频位移
亚磺酸	≈1090	≈9.17	s	强吸收带
R—SO—OH				
亚磺酸酯	1135～1125	8.81～8.89	s	强吸收带
R—SO—OR′				
亚硫酸酯 RO—SO—OR′	1215～1150	8.23～8.70	s	强吸收带，此外，ν_{as}(S—O—C)和ν_s(S—O—C)分别在（1020～950）cm^{-1}和（830～690）cm^{-1}吸收
亚磺酰氯				
R—SO—Cl	≈1150	8.70	s	强吸收带
砜	1350～1290,	7.41～7.75		分别为$\nu_{as}(SO_2)$和$\nu_s(SO_2)$（下同），反对称伸缩振动吸收带常常分裂成一组峰。
$R-SO_2-R$	1160～1120	8.62～8.93		
磺酸				
$R-SO_2OH$	1352～1342,	7.40～7.45		
磺酰胺	1165～1150	8.58～8.70		
$RSO_2N<$	1380～1310	7.25～7.63		
磺酸酯	1180～1140	8.47～8.77		
$R-SO_2-OR'$	1370～1355	7.30～7.38		
磺酰氯	1175～1165	8.51～8.58		
$R-SO_2-Cl$	1390～1360	7.19～7.35		
硫酸酯	1185～1168	8.44～8.56		
$RO-SO_2-OR'$	1415～1390	7.07～7.19		此外 ν_{as}（S—O—C）和 ν_s（S—O—C）分别在（1020～850）cm^{-1}和（830～690）cm^{-1}
	1200～1187	8.33～8.42		
磺酸盐				
$R-SO_2-O^-M^+$	1192～1175	8.39～8.51		

（十）含卤化合物

表 19-47　有机氟化物的红外特征频率

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
C—F	1400～1000	7.14～10.00	s	C—F 伸缩（一般范围）
	830～520	12.05～19.23	s	C—F 变形（一般范围）
脂肪单氟化合物	1110～1000	9.01～10.00	vs	C—F 伸缩
	780～680	12.81～14.71	s	C—F 变形
脂肪族双氟化合物	1250～1050	8.00～9.52	vs	两个带 C—F 伸缩
多氟烷烃	1360～1090	7.36～9.18	vs	许多带
CF_3-CF_2-	1365～1325	7.33～7.55	m-s	C—F 伸缩
	745～730	13.42～13.70	s	C—F 变形
$-CF_3$	1350～1120	7.41～8.93	vs	许多带
	780～680	12.82～14.71	s	
	680～590	14.71～16.95	s	不对称 CF_3 变形
	600～540	16.67～18.52	s	对称 CF_3 变形 } α-不饱和化合物可能不存在
	555～505	18.02～19.80	s	不对称 CF_3 变形 } α-不饱和化合物可能不存在
	460～200	21.74～50.00	s	不对称和对称平面摇摆振动 2 个带
环 $-CF_2-$（四或五元环）	1350～1140	7.41～8.77	s	
$>C=CF_2$	1755～1735	5.70～5.76	vs	C═C 伸缩
	525～505	19.05～19.80	m-s	弯曲振动
	515～355	19.42～28.17	s	

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
	455～345	21.98～28.99	m-s	平面摇摆振动
—CF=CF₂	1800～1780	5.55～5.62	s	C=C 伸缩
	1340～1300	7.46～7.69	vs	C—F 伸缩
三氟甲基芳香族化合物	1330～1310	7.52～7.63	m-s	C—F 伸缩
Ar—CF_3	600～580	16.67～17.24	s	—CF_3 平面摇摆振动

表 19-48 有机氯化物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
C—Cl	760～505	13.10～19.80	s	C—Cl 伸缩(一般范围)
	450～250	22.22～40.00	s	C—Cl 变形(一般范围)
R—$(CH_2)_2$Cl Cl—$(CH_2)_{n>3}$Cl	730～720	13.70～13.89	s	—CH_2Cl 在 1300～1240cm⁻¹有强带
	655～645	15.27～15.50	s	CH_2 非平面摇摆
R$(CH_2)_2$CH$(CH_3)_2$Cl	680～670	14.71～14.93	s	
	≈625	≈16.00	w-m	容易忽略
	615～610	16.26～16.39	s	
R$(CH_2)_2$CR′(CH_3)Cl	630～610	15.87～16.39	m-s	
(R′=Me or Et)	580～560	17.24～17.86	m-s	
多氯化合物	800～700	12.50～14.29	vs	
>C—CCl_2	500～320	20.00～31.25	m	弯曲振动
	265～235	37.74～42.55	w	
	260～180	38.46～55.56	s	平面摇摆
氯甲酸酐	≈690	≈14.49	s	C—Cl 伸缩
RO—COCl	485～470	20.62～21.28	s	C—Cl 变形
RS—COCl	≈580	≈17.24	s	C—Cl 伸缩
	350～340	28.57～29.41	s	C—Cl 变形
>N—Cl	805～690	12.42～14.49		
平伏键 C—Cl	780～740	12.80～13.51	s	
直立键 C—Cl	730～580	13.70～17.25	s	
伯卤代烃	730～720	13.70～13.89	s	氯原子相对于 C 原子为反式
	660～650	15.15～15.38	s	氯原子相对于 H 原子为反式
	685～680	14.60～14.71	s	在支链烷烃中氯原子相对于 H 原子为反式
仲卤代烃	≈760	≈13.10	m	Cl 原子对 2 个 C 原子为反式
	675～655	14.81～15.27	m-s	Cl 原子对 C 和 H 原子为反式
	640～625	15.63～16.00	w	在弯曲分子中 Cl 原子对 2 个 H 原子为反式
	615～605	16.26～16.53	s	Cl 原子对 2 个 H 原子为反式
叔卤代烃	580～560	17.24～17.86	m-s	Cl 原子对 3 个 H 原子为反式
	635～610	15.75～16.39	m-s	Cl 原子对 1 个 C 和 2 个 H 原子为反式

表 19-49 有机溴化物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
C—Br	650～485	15.38～20.62	s	C—Br 伸缩,(一般范围)
	300～140	33.33～71.43	m	C—Br 变形,(一般范围)
R—$(CH_2)_2$Br	645～635	15.50～15.75	s	C—Br 伸缩，(C—$(CH)_2$Br)
	565～555	17.70～18.02	s	
	440～430	22.73～23.26	v	—CH_2Br 在近 1230cm⁻¹有强带(CH_2 的非平面摇摆)
Br$(CH_2)_{n>3}$Br	645～635	15.50～15.75	s	C—Br 伸缩
	565～555	17.70～18.02	s	C—Br 伸缩
	490～480	20.41～20.83	w-m	
	445～425	22.47～23.53	w-m	

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
R—$CH_2CHR'CH_2Br$	650～645	15.38～15.50	s	C—Br 伸缩,反式
(R'=Me 或 Et)	620～610	16.13～16.39	s	C—Br 伸缩,旁式
	515～500	19.42～20.00	v	
R—$(CH_2)_2CH(CH_3)Br$	620～605	16.13～16.53	s	
	590～575	16.95～17.39	m-w	
	540～530	18.52～18.87	s	
R—$(CH_2)_2C(CH_3)_2Br$	600～595	16.67～16.81	m-s	
	525～505	19.05～19.80	s	
$>C=CBr_2$	310～250	32.26～40.00	s	弯曲振动
	185～135	54.05～74.07	m	
	160～120	62.50～83.33	s	平面摇摆
平伏键 C—Br	750～685	13.33～14.60	s	
直立键 C—Br	690～550	14.50～18.20	s	

表 19-50 有机碘化物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
C—I	600～200	16.67～50.00	s	C—I 伸缩,(一般范围)
	300～50	33.33～200.00	v	C—I 变形(一般范围)
$R(CH_2)_2I$	600～585	16.67～17.09	s	C—I 伸缩, —CH_2I 在近 $1170cm^{-1}$有强谱带(CH_2 非平面摇摆)
	515～500	19.42～20.00	s	C—I 伸缩
$I(CH_2)_{n>3}I$	≈595	≈16.81	s	C—I 伸缩
	≈500	≈20.00	s	C—I 伸缩
仲碘代烷烃	≈575	≈17.39	s	
	550～520	18.18～19.23	s	
	490～480	20.41～20.83	s	
叔碘化物	580～560	17.24～17.86	s	C—I 伸缩
	510～485	19.61～20.62	m	C—I 伸缩
	485～465	20.62～21.51	s	
$>C—CI_2$	≈200	≈50.00		弯曲振动
	≈100	≈100.00		
	≈50	≈200.00		平面摇摆
平伏键 C—I	≈655	≈15.27	s	液相
直立键 C—I	≈640	≈15.63	s	液相

表 19-51 芳香族卤化物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
芳香族卤化物(X=Cl,Br,I)	≈1050	≈9.52	m	灵敏带
芳香族氟化物	1270～1100	7.87～9.09	m	近似范围,灵敏带
	680～520	14.71～19.23	m-s	芳香 C—F 伸缩和环变形
	420～375	23.81～26.67	v	面内芳香族 C—F 弯曲
	340～240	29.41～41.67	s	面外芳香族 C—F 弯曲
芳香族氯化物	1060～1035	9.43～9.66	m	邻位取代苯 } 敏感谱带
	1080～1075	9.26～9.30	m	间位取代苯 } 敏感谱带
	1100～1090	9.09～9.17	m	对位取代苯 } 敏感谱带
	760～395	13.10～25.32	s	不总是存在
	500～370	20.00～27.03	m-s	芳香 C—Cl 伸缩和环的变形
	390～165	25.64～60.61	m-s	面外芳香 C—Cl 弯曲 } 并不总是存在
	330～230	30.30～43.48	m-s	面内芳香 C—Cl 弯曲 } 并不总是存在

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
芳香族溴化物	1045~1025	9.57~9.76	m	邻位取代苯 }敏感谱带
	1075~1065	9.30~9.39	m	间位和对位取代苯 }敏感谱带
	400~260	25.00~38.46	s	芳香族 C—Br 伸缩和环变形
	325~175	30.77~57.14	m-s	面外芳香 C—Br 弯曲
	290~225	34.48~44.44	m-s	面内芳香 C—Br 弯曲
芳香族碘化物	1060~1055	9.43~9.48	m-s	对位取代苯的敏感带
	310~160	32.26~62.50	s	面外芳香 C—I 弯曲
	265~185	37.74~54.05		芳香 C—I 伸缩和环变形
	≈200	≈50.00		面内芳香 C—I 变形

(十一)有机硼化物

表 19-52 有机硼化物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
B—H (游离)	2565~2480	3.90~4.03	m-s	B—H 伸缩
	1180~1110	8.48~9.01	s	B—H 面内变形
	920~900	10.87~11.11	m-w	面外弯曲
烷基二硼烷 $B—H_2$ (游离)	2640~2570	3.79~3.89	m-s	对称 $B—H_2$ 伸缩
	2535~2485	3.95~4.02	m-s	不对称 $B—H_2$ 伸缩
	1205~1140	8.30~8.77	m-s	$B—H_2$ 变形、有时宽
	975~920	10.26~10.87	m	$B—H_2$ 非平面摇摆
烷基二硼烷	2140~2080	4.67~4.81	w-m	H原子的面内对称运动
B⋯H⋯B(桥连的 H)	1990~1850	5.03~5.41	w	H原子的面外对称运动，几个键
	1800~1710	5.56~5.85	w-m	H原子的面外不对称运动
	1610~1540	6.21~6.49	vs	H原子的面内不对称运动
$B—H_3$	2380~2315	4.20~4.32	s	不对称 $B—H_3$ 伸缩
	2285~2265	4.38~4.42	s	对称 B—H 伸缩
	≈1165	≈8.58	s	$B—H_3$ 变形
BH_4^-(离子)	2310~2195	4.33~4.56	s	B—H 伸缩，两个谱带(其中之一是由费米共振产生)
B—R	1270~620	7.87~16.13	v	B—C 伸缩，BR_3 化合中，由不对称 C—B—C 伸缩产生一强谱带，由对称 C—B—C 伸缩产生一弱谱带(有时不存在)
B—O	1380~1310	7.25~7.63	s	B—O 伸缩
$B(RO)_3$	1350~1310	7.41~7.63	vs	宽，由于 C—O 伸缩在(1070~1040)cm^{-1}处有强谱带
$(RO)_2Bph$①	1435~1425	6.97~7.02	m-s	B—C 伸缩
	1330~1310	7.52~7.63	s	不对称 C—O—B—O—C 伸缩
	1180~1120	8.48~8.93	s	对称 C—O—B—O—C 伸缩
	675~600	14.81~16.67	m-s	B—O 变形
R_2BOR	1350~1310	7.41~7.63	s	B—O 伸缩
OR B R—N N—R RO—B B—OR N R	1500~1435	6.67~6.97	s	B—N 伸缩
	1330~1310	7.52~7.63	m-s	B—O 伸缩
OG B O O GO—B B—OG O (G = 烷基或芳基)	1380~1335	7.25~7.49	s	B—O 伸缩
	1225~1080	8.16~9.26	s	C—O 伸缩

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
X—B(—O—B(X)—O—B(X)—O—)（环） (X＝卤素)	1470～1180	6.80～8.48	s	B—O 伸缩
邻苯二氧基 B—Ar②	1360～1330	7.35～7.52	s	不对称 B—O 伸缩
	1240～1235	8.07～8.10	s	不对称 C—O 伸缩
	1075～1065	9.30～9.39	s	对称 C—O 伸缩
R—B(—O—B(R)—O—B(R)—O—)（环）	1390～1355	7.19～7.38	s	B—O 伸缩
	1255～1145	7.97～8.74	m	B—C 伸缩
$M_x(BO_3)_y$	1280～1200	7.82～8.34	s	宽,不等称 B—O 伸缩
	≈900	≈11.11	w	对称 B—O 伸缩
(XB—NR)$_3$（环）：X R / B—N / R—N B—X / B—N / X R	1510～1400	6.62～7.14	s	B—N 伸缩
	720～635	13.89～15.75	—	B—N 变形
硼氟化合物	1500～840	6.67～11.9	v	B—F 伸缩
XBF_2	1500～1410	6.67～7.09	s	不对称 B—F 伸缩
	1300～1200	7.69～8.33	s	对称 B—F 伸缩
X_2BF	1360～1300	7.35～7.69	s	B—F 伸缩
BF_3	1260～1125	7.94～8.89	s	不对称 B—F 伸缩
	1030～800	9.71～12.50	s	对称 B—F 伸缩
BF_4^-	≈1030	≈9.71	vs	不对称 B—F 伸缩,肩峰在 1060cm⁻¹
—S—B(—S)—S—	955～905	10.47～11.05	s	不对称 B—S 伸缩

① ph——苯环。

② Ar——芳基。

（十二）有机磷化物

表 19-53 有机磷化物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
P—H 振动				
P—H	2455～2265	4.07～4.42	m	P—H 伸缩
	1150～965	8.70～10.36	w-m	P—H 变形
烷基膦，P—H	2285～2265	4.38～4.42	m	P—H 伸缩
	1100～1085	9.09～9.21	m	$P—H_2$ 剪式振动
	1065～1040	9.39～9.62	w-m	P—H 变形
	940～910	10.64～10.99	m	PH_2 非平面摇摆
芳基膦，P—H	2285～2270	4.38～4.41	m	P—H 伸缩
	1100～1085	9.09～9.21	m	P—H 变形
膦酸酯，$(GO)_2HP═O$	2455～2400	4.07～4.17	m	P—H 伸缩

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
膦氧化物 $G_2HP=O$	2340～2280	4.27～4.39	m	P—H 伸缩
	990～965	10.10～10.36	m-s	P—H 非平面摇摆
$G_2HP=S$	950～910	10.53～10.99	m-s	P—H 非平面摇摆
$(RO)_2HP=O$	980～960	10.20～10.42	vs	可能是由于 P—O—C 伸缩和 P—H 非平面摇摆的相互作用
P—D	1795～1650	5.57～6.06	m	P—D 伸缩
	745～615	13.42～16.26	w-m	P—D 弯曲
P—C 和 PC—H 振动				
P—C	795～650	12.85～15.38	m-s	P—C 伸缩
$P—CH_3$	1430～1390	6.99～7.19	m-s	不对称 CH_3 变形
	1345～1275	7.49～7.85	m-s	对称 CH_3 变形
	980～840	10.20～11.90	s	CH_3 变形，常为双峰，P(V)化合物在(935～870) cm^{-1} P(Ⅲ)在(905～860) cm^{-1}，$\geqslant PHCH_3$，在≈845cm^{-1}
	790～770	12.66～12.99	s	P—C 伸缩
$\geqslant PHCH_3$	850～840	11.76～11.90	m-s	
$P(CH_3)_2$	960～835	10.42～10.70	m-s	双或 3 个峰
$(RO)_2PCH_3$	1285～1270 870～865	7.77～7.87 11.49～11.56	m-s s	$P—CH_3$ 带
$CH_3(RO)HP=O$	1300～1295 850～840	7.69～7.72 11.76～11.90	m-s s	$P—CH_3$ 带
$CH_3(RO)_2P=O$	1320～1305 930～885	7.58～7.66 10.75～11.30	m-s s	$P—CH_3$ 带
$CH_3(RO)\overset{O}{\overset{\Vert}{P}}—O$	1310～1280 900～875	7.63～7.81 11.11～11.43	m-s s	$P—CH_3$ 带
$CH_3(RO)ClP=O$	1315～1300 925～885	7.60～7.69 10.81～11.30	m-s s	$P—CH_3$ 带
$P—C_2H_5$	1285～1225	7.78～8.17	w	双峰（P(Ⅲ)化合物在(1235～1205) cm^{-1} 有中强带）
$P—CH_2—P$	845～780	11.83～12.82	m-s	不对称 P—C—P 振动
	770～720	12.99～13.89	m-s	对称 P—C—P 振动
$P—CH_2—$	1440～1405	6.94～7.12	m	CH_2 变形
	780～760	12.82～13.16	s	P—C 伸缩
$P—CH_2—Ar$[3]	795～740	12.58～13.51	s	P—C 伸缩
P—Ar	≈3050	≈3.33	m-w	C—H 伸缩
	≈1600 ≈1500 1455～1425	≈6.25 ≈6.67 6.90～7.02	m-w m-w m-s	芳香环面内伸缩
	1010～990	9.09～10.10	m-s	芳香环振动和 P—C 伸缩的相互作用
	560～480	17.86～20.83	m-s	
P—Ph	1130～1090	8.85～9.71	s	
	750～680	13.33～14.71	s	
P—N—Ph	1425～1380	7.02～7.25	w-m	
P—O—H 振动				
$>P(=O)OH$	2725～2525	3.76～3.96	w-m	宽，OH 伸缩，氢键
	2350～2080	4.26～4.81	w-m	宽，芳香族亚膦酸可能是双峰
	1740～1600	5.75～6.25	w-m	宽，OH 变形
	1335～1080	7.55～9.26	s	P=O 伸缩
	1040～910	9.62～10.99	s	尖，P—O 伸缩
	540～450	18.52～22.22	w-m	常是双峰
$>P(=S)OH$	3100～3000	3.23～3.33	w	宽，OH 伸缩
	2360～2200	4.24～4.55	w	宽，OH 伸缩
	935～910	10.70～10.99	s	P—O 伸缩
	810～750	12.35～13.33	m-s	P=S 伸缩
	655～585	15.27～17.12	v	P=S 伸缩
P—O—C 振动				
P—O—R	1050～970	9.52～10.31	vs	不对称 P—O—C 伸缩

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
	850～740	11.76～13.51	w-m	有时十分弱
P—O—CH_3	1190～1170	8.40～8.55	w-m	CH_3 变形
	1090～1010	9.17～9.90	vs	不对称 P—O—C 伸缩变形
	830～740	12.05～13.51	s	对称 P—O—C 伸缩(不对称伸缩～1050cm⁻¹)
P—O—C_2H_5	1165～1155	8.59～8.68	w-m	CH_3 平面摇摆
	830～740	12.05～13.51	s	对称 P—O—C 伸缩
P—O—CH_2R	1170～1100	8.55～9.09	w-m	许多带
异丙基 —O—P	1190～1170	8.40～8.55	w	
	1150～1135	8.70～8.81	w	
	1115～1100	8.97～9.09	w	
P—O—Ar	1460～1445	6.85～6.92	w-m	
	1260～1160	7.94～8.62	s	尖 O—C 伸缩
	995～915	10.05～10.93	vs	宽 P—O—C 伸缩(5价)
	875～855	11.43～11.70	s	P—O—C 伸缩(3价)
	790～740	12.66～13.51	s	对称 P—O—C 伸缩
	625～570	16.00～17.54	s	P—O—Ar 变形
烷基亚磷酸酯$(RO)_3P$	1050～990	9.52～10.10	vs	P—O—C 伸缩
芳基亚磷酸酯$(ArO)_3P$	1240～1190	8.07～8.40	vs	P—O—C 伸缩
亚磷酸酯$(GO)_3P$	580～510	17.24～19.61	m	
	580～400	17.24～25.00	s	
	400～295	25.00～33.90	s	
亚磷酸氢酯	560～545	17.86～18.35	s	
	540～500	18.52～20.00	w-m	
P═O 振动				
P═O (未缔合)	1350～1175	7.41～8.51	vs	P═O 伸缩
P═O (缔合)	1250～1150	8.00～8.70	vs	P═O 伸缩
烷基磷酸酯 $(RO)_3P$═O	1285～1255	7.78～7.97	vs	P═O 伸缩
	1050～990	9.52～10.10	vs	P—O—C 伸缩
	595～520	16.81～19.23	m	宽
	495～465	20.20～21.51	m	宽
	430～415	23.26～24.10	w	
	395～360	25.32～27.78		
芳基磷酸酯 $(ArO)_3P$═O	1315～1290	7.61～7.75	vs	P—O 伸缩
	1240～1190	8.07～8.40	vs	P—O—C 伸缩
	625～575	16.00～17.39	s	
	570～540	17.54～18.52	s	
	510～490	19.61～20.41		
	460～430	21.74～23.26	m-w	
酸式磷酸酯				
$(RO)_2(HO)P$═O	1250～1210	8.00～8.26	vs	P═O 伸缩
	590～460	16.95～21.74	m	宽
	400～380	25.00～26.32	w	在磷酸酯中观察不到
$(ArO)_2(HO)P$═O	600～580	16.67～17.24	s	对环的取代敏感
	565～535	17.70～18.69	s	
	515～500	19.42～20.00	s	
	490～470	20.41～21.28	s	
	400～380	25.00～26.32	w	在磷酸酯中观察不到
$(RO)(HO)_2P$═O	≈1250	≈8.00	vs	P═O 伸缩(芳香化合物≈1200cm⁻¹)
膦酸酯 $G(RO)_2P$═O	1265～1230	7.91～8.13	vs	P═O 伸缩
	800～750	12.50～13.33	w-m	P—O—C 伸缩
烷基膦酸酯	570～500	17.54～20.00	m	宽
$R(RO)_2P$═O	490～410	20.41～24.39	m	宽
	440～400	22.73～25.00	w	
芳基膦酸酯	620～600	16.13～16.67	m	
$Ar(ArO)_2P$═O	535～515	18.69～19.42	s	
	500～480	20.00～20.83	vw	
	425～415	23.53～24.10	vw	

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
二烷基芳基膦酸酯				
$(RO)_2ArP{=}O$	585～565	17.09～17.70	s	
	530～520	18.87～19.23	s	
	435～420	22.99～23.81	w	
	320～310	31.25～32.26	w	
膦酸氢酯				
$R'(RO)(HO)P{=}O$	1215～1170	8.23～8.55	vs	P=O 伸缩
	570～540	17.54～18.52	m	宽
	500～450	20.00～22.22	m	宽
	320～300	31.25～33.33	w	
$Ar'(ArO)(OH)P{=}O$	1220～1205	8.20～8.30	vs	P=O 伸缩
	605～570	16.53～17.54	s	
	550～535	18.18～18.69	s	
	495～485	20.20～20.62	m	
	≈460	≈21.74	m	
	430～420	23.26～23.81	m	
	370～350	27.03～28.57	w	
	315～290	31.75～34.48	w	
$(RO)(HO)HP{=}O$	1215～1200	8.23～8.33	vs	P=O } 伸缩
$(RO)_2HP{=}O$	1265～1250	7.97～8.00	vs	P=O } 伸缩
$(RO)_2FP{=}O$	1315～1290	7.61～7.75	vs	P=O } 伸缩
$(ArO)_2FP{=}O$	1330～1325	7.52～7.55	vs	P=O } 伸缩
$(RO)_2ClP{=}O$	1310～1280	7.63～7.81	vs	P=O 伸缩（CN 取代的化合物在大约 1290cm^{-1}）
$(RO)_2(RS)P{=}O$	1270～1245	7.87～8.06	vs	P=O 伸缩
$(RO)_2(NH_2)P{=}O$	1250～1220	8.00～8.20	vs	P=O 伸缩
$(ArO)_2(NH_2)P{=}O$	≈1250	≈8.00	vs	P=O 伸缩
$(RO)_2(NHR)P{=}O$	1260～1195	7.94～8.36	vs	P=O 伸缩
$(RO)_2(NR_2)P{=}O$	1275～1250	7.84～8.00	vs	P=O 伸缩
$R_2(R'O)P{=}O$	1220～1180	8.20～8.48	vs	P=O 伸缩
$R_2(HO)P{=}O$	1190～1140	8.40～8.77	vs	P=O 伸缩
$Ar_2(HO)P{=}O$	1205～1085	8.30～9.21	vs	P=O 伸缩
$R(HO)HP{=}O$	1175～1135	8.51～8.81	vs	P=O 伸缩
$R_3P{=}O$	1185～1150	8.44～8.70	vs	P=O 伸缩
$Ar_3P{=}O$	1190～1175	8.40～8.51	vs	P=O 伸缩
$R_2HP{=}O$	≈1155	≈8.66	vs	P=O 伸缩
$Ar_2HP{=}O$	1185～1170	8.44～8.55	vs	P=O 伸缩
$R_2ClP{=}O$	≈1215	≈8.23	vs	P=O 伸缩
$Ar_2ClP{=}O$	≈1235	≈8.10	vs	P=O 伸缩
$G_2BrP{=}O$	≈1250	≈8.00	vs	P=O 伸缩
$(RS)_3P{=}O$	≈1200	≈8.33	vs	P=O 伸缩
$(ArS)_3P{=}O$	≈1210	≈8.26	vs	P=O 伸缩
$R_2(RS)P{=}O$	≈1200	≈8.33	vs	P=O 伸缩
$(RHN)_3P{=}O$	1230～1215	8.18～8.23	vs	P=O 伸缩
$(R_2N)_3P{=}O$	1245～1190	8.03～8.40	vs	P=O 伸缩
$R_2(NHR)P{=}O$	1180～1150	8.48～8.66	vs	P=O 伸缩
$R(NHR)_2P{=}O$	1220～1160	8.20～8.62	vs	P=O 伸缩
$\geq P(=O)—O—P(=O)\leq$	1310～1205	7.63～8.30	vs	P=O 伸缩（通常是一个带，若不对称可出现两个谱带）
$(RO)_2P(=O)—O—P(=O)(RO)_2$	1240～1205	8.07～7.63	vs	P=O 伸缩（通常一个带）
	1310～1280	7.63～7.81	vs	P=O 伸缩
	1270～1250	7.87～8.00	vs	P=O 伸缩
$R(RO)P(=O)—O—P(=O)(RO)R$	930～915	10.75～10.93	s	宽，不对称 P—O—P 伸缩
P—O—P	1025～870	9.85～11.49	s	通常宽，不对称伸缩出现在（945～925）cm^{-1}（在 700cm^{-1}附近还可看到弱带）

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
>P(═O)—S—C	615～555	16.26～18.18	m	
	575～510	17.39～19.61	m	
P═S 振动				
P═S	865～655	11.56～15.27	m-s	
	730～550	13.70～18.18	v	
(OH)P═S	810～750	12.35～13.33	m	
	655～585	15.27～17.09	v	
>P(═O)—OP<	865～770	11.56～12.99	m	
	610～585	16.39～17.09	v	
>P(X)═S (X=F 或 Cl)	835～750	11.98～13.33	m-s	
	730～590	13.70～16.95	v	
>P(═S)—S—C	545～510	18.35～19.61	m-s	
	520～475	19.23～21.05	m	
>P(═S)—N<	860～725	11.63～13.79	m-s	
	715～570	13.99～17.54	v	
—P(Cl)(═S)—N	810～765	12.35～13.07	m-s	
	670～605	14.93～16.53	v	
P═Se	590～515	16.95～19.42	m	P═Se 伸缩
	535～420	18.69～23.81	m	
P═Te	470～400	21.28～25.00		P═Te 伸缩
$R_3P═S$	770～685	12.99～14.60	m	
	595～530	16.81～18.87	v	($(RS)_3P═S$ ≈690cm⁻¹)
$(RO)_3P═S$	845～800	11.83～12.50	m	
	665～600	15.04～16.67	v	
$R(RO)_2P═S$	805～770	12.42～12.99	m	
	650～595	15.38～16.81	v	
$R_2(RO)P═S$	795～770	12.58～12.99	m	
	610～580	16.39～17.24	v	
$(RO)_2(RS)P═S$	835～790	11.98～12.66	m	
	665～645	15.04～15.50	m-s	
$(RO)_2(RS)P═Se$	≈590	≈16.95	s	P═Se 伸缩
$(RO)_2(SH)P═S$	865～835	11.56～11.98	m	S—H 弯曲振动
	780～730	12.82～13.70	m	
	660～650	15.15～15.38	m-s	
$R_2ClP═S$	775～750	12.90～13.33	m	
	625～590	16.00～16.95	m-s	
$RCl_2P═S$	780～775	12.82～12.90	s	($(RO)Cl_2P═S$ ≈830cm⁻¹)
	670～640	14.93～15.63	m-s	
$(R_2N)_3P═S$	840～790	11.90～12.66	m	
	715～690	13.99～14.49	m-s	
	660～635	15.15～15.75	s	可能是由 P═S 引起
$(MS)(RO)_2P═S$ M=Zn,Cd,Ni	555～535	18.02～18.69	s	可能是由 P—S—M 基团引起
P—N 振动				
P—N	1110～930	9.01～10.75	m-s	可能是 P—N—C 不对称伸缩
	750～680	13.33～14.71	m-s	对称 P—N—C 伸缩
P(Ⅲ)—N	1010～790	9.90～12.66	m-s	
$P—N—CH_3$	1320～1260	7.58～7.94	m	
	1205～1155	8.30～8.66	w-m	
	1080～1050	9.26～9.52	w-m	

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
	1010~935	9.90~10.70	s	
P—N(C_2H_5)$_2$	1225~1190	8.16~8.40	—	P(Ⅴ),m-s;P(Ⅲ),w
	1190~1155	8.40~8.66	—	P(Ⅴ)m;P(Ⅲ),s
	1110~1085	9.01~9.22	w-m	
	1075~1055	9.30~9.48	w-m	
	1050~1015	9.52~9.85	m-s	
	975~930	10.26~10.75	m-s	
	930~915	10.75~10.93	w	不总是见到
P=N（环化合物）	1440~1170	6.94~8.55	vs	P=N 伸缩
P=N（无环化合物）	1500~1230	6.67~8.13	s	P=N 伸缩
(RO)$_3$P=N—Ar R(RO)$_2$P=N—Ar }	1385~1325	7.22~7.55	s	P=N 伸缩
R—NH—P(O)Cl_2	≈560	≈17.86		
—O—NH—P(O)Cl_2	545~520	18.35~19.23		
>N—P(S)Cl_2	525~490	19.05~20.41		
—O—O—PCl_2	510~495	19.61~20.20		
	475~465	21.05~21.51		
—O—O—P(O)Cl_2	≈590	≈16.95		
—O—O—P(S)Cl_2	560~535	17.86~18.69		
(RO)Cl_2P=O	≈570	≈17.54		
(RO)Cl_2P=S	≈535	≈18.69	s	
$R_2PO_2^-$	1200~1100	8.33~9.09	s	不对称 PO_2 伸缩
	1075~1000	9.30~10.00	s	对称 PO_2 伸缩
$RHPO_2^-$				
$(RO)_2PO_2^-$(salt)	1285~1120	9.78~8.93	s	不对称 PO_2^- 伸缩
	1120~1050	8.93~9.52	s	对称 PO_2^- 伸缩
$R(RO)PO_2^-$	1245~1150	8.03~8.70	s	不对称 PO_2^- 伸缩
	1110~1050	9.01~9.52	s	对称 PO_2^- 伸缩
RPO_3^{2-}	1125~970	8.89~10.31	s	不对称 PO_3^{2-} 伸缩
	1000~960	10.00~10.42	w-m	对称 PO_3^{2-} 伸缩
$ROPO_3^{2-}$	1140~1055	8.77~9.48	s	不对称 PO_3^{2-} 伸缩
	995~945	10.05~10.58	w-m	对称 PO_3^{2-} 伸缩
R_2POS^-	1140~1050	8.77~9.52	s	P—O 伸缩
	570~545	17.54~18.35	m	P—S 伸缩
$(RO)_2POS^-$ $R(RO)POS^-$ }	1215~1110	8.24~9.01	s	P—O 伸缩
	660~575	15.15~17.39	m	P—S 伸缩
无机盐 PO_2^-	1300~1150	7.69~8.70	s	
无机盐 PO_3^{2-}	1030~970	9.71~10.31	s	不对称伸缩
	990~920	10.10~10.87	m	对称伸缩
无机盐 PO_4^{3-}	1100~1000	9.09~10.00	s	
PS_2^-	585~545	17.09~18.35		
P(Ⅲ)—F	770~760	12.99~13.10	m-s	
P(Ⅴ)—F	930~805	10.75~12.42	m-s	
R_2P(O)F	835~805	11.98~12.42	m-s	P—F 伸缩
RP(O)F_2	930~895	10.75~11.17	m-s	P—F 伸缩
P—Cl	605~435	16.53~22.99	m-s	
P—Br	485~400	20.62~25.00	m-s	
PCl_2	590~485	16.95~20.62	s	
	545~420	18.35~23.81	m-s	
P—Cl 此处 P 与 O,C 或 F 键合	565~440	17.70~22.73	m-s	
P—Cl 此处 P 与 N 或 S 键合	540~435	18.52~22.99	m-s	
P—S—H	550~525	18.18~19.05	m	
	525~490	19.05~20.41	m	
P—S—C	1050~970	9.52~10.31		（在脂肪族化合物中可见到）
	565~550	17.70~18.18	m	
	490~440	20.41~22.73	m	

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
P—O—P	1025～870	9.85～11.49	s	通常宽不对称伸缩在(945～925)cm^{-1}(在700cm^{-1}附近可看到弱带)
P—S—P	≈500	≈20.00	m	
	495～460	20.20～21.74	m	
P—O—S	930～815	10.75～12.27		不对称 P—O—S 伸缩
	765～700	13.07～14.29		
P—O—Si	1070～855	9.35～11.70		
P—C═C	1645～1595	6.08～6.27	m	C═C 伸缩
P—C—C═C	1660～1630	6.02～6.14	m	C═C 伸缩
P—C≡N	2220～2180	4.51～4.59	m	C≡N 伸缩

① Ar——芳基。

（十三）有机硅化合物

表 19-54 有机硅化合物的红外特征频率

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
硅烷				
Si—H	2250～2100	4.44～4.76	s	Si—H 伸缩，一般范围
	985～800	10.15～12.50	s	Si—H 变形，一般范围
—SiH_3	2160～2140	4.63～4.67	s	Si—H 伸缩
	945～910	10.58～10.99	s	两个谱带，不对称和对称变形
	680～540	14.71～18.52	s	平面摇摆振动
＞SiH_2	2150～2115	4.65～4.73	s	Si—H 伸缩
	945～920	10.58～10.87	s	Si—H 变形
	895～840	11.17～11.90	s	非平面摇摆振动
	745～625	13.42～16.00	w-m	卷曲振动
	600～460	16.67～21.74	m	平面摇摆，尖峰
—＞SiH	2135～2095	4.68～4.77	s	Si—H 伸缩
	845～800	11.83～12.50	s	非平面摇摆
Si—D	1690～1570	5.92～6.37	s	Si—D 伸缩
	710～665	14.08～15.04	s	Si—D 变形
R_3Si	1280～1240	7.81～8.07	s	对称 Si—C 弯曲振动
	850～800	11.76～12.50	s	Si—C 平面摇摆
	760～750	13.10～13.33	s	Si—C 平面摇摆
$Si(CH_3)_n$	1280～1250	7.81～8.00	s	对称 CH_3 变形，尖
(n=1,2,3,4)	860～760	11.63～13.61	s	Si—CH_3 平面摇摆
—＞$SiCH_3$	≈765	≈13.07	s	Si—C 平面摇摆
＞$Si(CH_3)_2$	≈855	≈11.70	vs	Si—C 平面摇摆
	815～800	12.27～12.50	vs	Si—C 平面摇摆
—$Si(CH_3)_3$	≈840	≈11.90	vs	Si—C 平面摇摆
	≈765	≈13.07	vs	Si—C 平面摇摆
	330～240	30.30～41.67	w	$Si(CH_3)_3$ 平面摇摆
Si—C_2H_5	1250～1220	8.00～8.20	m	CH_2 非平面摇摆
	1020～1000	9.80～10.00	m	
	970～945	10.31～10.58	m	
Si—CH_2R	1250～1175	8.00～8.51	w-m	长链脂肪族吸收在范围的低频末端
	760～670	13.10～14.93	m	CH_2 平面摇摆
Si—CH═CH_2	≈1925	≈5.20	w	倍频
	1610～1590	6.21～6.29	m	C═C 伸缩
	1410～1390	7.09～7.19	s	CH_2 面内变形
	1010～1000	9.90～10.00	m	反式 CH 非平面摇摆
	980～940	10.20～10.64	s	CH_2 非平面摇摆
	580～515	17.24～19.42	w	H 的面外变形
Si—Ph	3080～3030	3.25～3.30	m	C—H 伸缩
	≈1600	≈6.25	m	环的伸缩
	1480～1425	6.99～7.02	m	环的振动，尖

续表

官能团	范围		强度	备注
	σ/cm⁻¹	λ/μm		
	1125～1090	8.89～9.17	vs	灵敏带
	≈730	≈13.70	s	面外 C—H 振动
	700～690	14.29～14.49	s	面外 C—H 振动
R_3SiPh	670～625	14.93～16.00	w	环面内弯曲
	490～445	20.41～22.47	s	Si—C—C 面外弯曲
	405～345	24.69～28.99	w	Si—C 伸缩和环面内变形
	≈290	≈34.48	v	Si—Ph 面内变形
R_2SiPh_2	635～605	15.75～16.53	w	环面内弯曲
	495～470	20.20～21.28	s	Si—C—C 面外弯曲
	445～400	22.47～25.00	w	不对称 Si—C 伸缩
	380～305	26.32～32.79	w	对称 Si—C 伸缩
$RSiPh_3$	625～605	16.00～16.53	w	环面内弯曲
	515～485	19.42～20.62	s	Si—C—C 面外弯曲
	445～420	22.47～23.81	w	不对称 Si—Ph 伸缩
	≈330	≈30.30	v	对称 Si—Ph 伸缩
环五亚甲基二烷基硅	495～480	20.20～20.83	m-s	可能由六元环形起，但环五亚甲基硅和二苯基衍生物无此峰
硅烷醇				
Si—OH	3700～3200	2.70～3.13	m	C—H 伸缩；宽
	955～835	10.47～11.98	s	Si—O 伸缩，对于凝相样品，在近 1030cm⁻¹出现宽，m-w 的带，属 SiOH 变形振动
甲硅烷基酯和醚				
$RCOSiR_3$	≈1620	≈6.17	s	C═O 伸缩
Si—O—R	1110～1000	9.01～10.00	vs	不对称 Si—O—C 伸缩，至少 1 个带，Si—O—Si 亦在这范围吸收
Si—O—CH_3	≈2860	≈3.50	m	对称 CH_3 伸缩
	≈1190	≈8.40	s	CH_3 平面摇摆
	≈1100	≈9.09	vs	不对称 Si—O—C 伸缩
	850～800	11.76～12.50	s	对称 Si—O—C 伸缩
$>Si(OCH_3)_2$	390～360	25.64～27.78	s	不对称 Si—O—C 伸缩
—$Si(OCH_3)_3$	480～440	20.83～22.73	s	不对称 Si—O—C 伸缩
	470～330	21.20～30.30	w	
Si—O—CH_2—	1190～1140	8.40～8.77	s	
	1100～1070	9.09～9.35	vs	不对称 Si—O—C 伸缩，通常是双峰
	990～945	10.10～10.64	s	对称 Si—O—C 伸缩
$>Si(OC_2H_5)_2$	475～405	21.05～24.69	w	不对称 Si—O—C 变形
—$Si(OC_2H_5)_3$	500～440	20.00～22.73	s	
Si—O—Ar	1135～1090	8.81～9.17	vs	几个尖峰，可能是 Si—O—C 伸缩
	970～920	10.31～10.87	s	
Si—O—Si Si—O—C	1090～1020	9.17～9.80	vs	Si—O 伸缩，2 个几乎等强的谱带，硅氧烷链的吸收近于 1085cm⁻¹和 1020cm⁻¹，随链长度增加其强度亦增加。环硅氧烷仅有 1 个强带，在四元或环更大时，有时能见到第二个谱带
二硅氧烷				
Si—O—Si	625～480	16.00～20.83	w	宽，对称 Si—O—Si 伸缩，取代二硅氧烷和线形聚合硅氧烷，该谱带出现在低频处
硅氧烷				
—$OSiCH_3$（末端基团）	850～840	11.76～11.90	s	Si—C 伸缩
—$OSiC_2H_5$（线形聚合物）	810～800	12.35～12.50	s	Si—C 伸缩
—$OSiCH_3$（环化合物）	820～780	12.20～12.82	s	Si—C 伸缩
甲硅烷基胺				
Si—NH_2	3570～3475	2.80～2.88	m	NH_2 伸缩
	3410～3390	2.93～2.95	m	NH_2 伸缩
	1550～1530	6.45～6.54	m	NH_2 变形
Si—NH—Si	≈3400	≈294	m	NH_2 伸缩
	≈1175	≈8.51	m	
	≈935	≈10.70	m	
氨基硅烷	880～835	11.36～11.98	s	不对称 N—Si—N 伸缩

续表

官能团	范围 σ/cm⁻¹	范围 λ/μm	强度	备注
$H_2N—\overset{\vert}{\underset{\vert}{Si}}—NH_2$	800～785	12.50～12.74	m	对称 N—Si—N 伸缩
硅卤化物				
→SiF	920～820	10.87～12.22	m	Si—F 伸缩[(一般范围：Si—F 伸缩(1000～800)cm^{-1}；Si—F 变形(425～265)cm^{-1}]
⟩SiF_2	945～915	10.58～10.93	s	可能是不对称伸缩
	910～870	10.99～11.49	m	可能是对称伸缩
—SiF_3	980～945	10.20～10.58	s	可能是不对称伸缩
	910～860	10.99～11.63	m	可能是对称伸缩
→SiCl	550～470	18.18～21.28	s	Si—Cl 伸缩[Si—Cl 变形(250～150)cm^{-1}]
⟩$SiCl_2$	595～535	16.81～18.69	s	不对称 Si—Cl 伸缩
	540～460	18.52～21.74	m	对称 Si—Cl 伸缩
—$SiCl_3$	625～570	16.00～17.54	s	不对称 Si—Cl 伸缩
	535～450	18.69～22.22	m	对称 Si—Cl 伸缩
→SiBr	430～360	23.26～27.78	w	Si—Br 伸缩
⟩$SiBr_2$	460～425	21.74～23.53	w	不对称 Si—Br 伸缩
	395～330	25.32～30.30	w	对称 Si—Br 伸缩
—$SiBr_3$	480～450	20.83～22.22	w	不对称 Si—Br 伸缩
	360～300	27.78～33.33	w	对称 Si—Br 伸缩
→SiI	365～280	27.40～35.71	w	对称 Si—I 伸缩
⟩SiI_2	390～330	25.64～30.30	w	Si—I 伸缩
	325～275	30.77～36.36	w	
—SiI_3	410～365	24.39～27.40	w	Si—I 伸缩
	280～220	35.71～45.45	w	
其他基团				
Si—Ph	1125～1090	8.89～9.17	s	
Ge—Ph	≈1080	≈9.26	s	
Sn—Ph	1080～1050	9.26～9.52	s	通常在 1065cm^{-1}
Pb—Ph	≈1050	≈9.52	s	
有机锗 Ge—O—Ge	900～700	11.11～14.29	s	不对称 Ge—O—Ge 伸缩，三元环≈850cm^{-1}，四元环≈860cm^{-1}，线形聚合物≈870cm^{-1}
有机锡 Sn—O	780～580	12.82～17.24	s	宽
有机铅 Pb—O	≈625	≈16.00	s	

五、有机化合物近红外吸收频率[2]

有机化合物在近红外谱区的吸收带主要是含氢基团的各级倍频与合频。表 19-55 给出了 C—H 、 N—H 、 O—H 的基频、合频、倍频吸收带的中心近似位置。表 19-56 给出了一些主要基团的基频与倍频吸收谱带。主要有机化合物主要基团与相应的近红外吸收谱带的对照图如图 19-3 所示。一些常在近红外区分析的物质和基团的谱带及其来源，见表 19-57。

表 19-55　C—H 、 N—H 、 O—H 的基频、合频、倍频吸收带的中心近似位置

基团		σ/cm⁻¹ C—H	σ/cm⁻¹ N—H	σ/cm⁻¹ O—H	λ①/μm C—H	λ①/μm N—H	λ①/μm O—H
基频	伸缩振动	3000	3400	3650	3300	2940	2740
	弯曲振动②	1450	1600	1350	6900	6250	7700
合频		4347	4545	5000	2300	2200	2000
一级倍频		5700	6600	7000	1750	1515	1430
二级倍频		8700	10000	10500	1150	1000	950

① 表内波数和波长值非严格对应。

② 表内 C—H 、 N—H 的弯曲振动特指剪式振动。

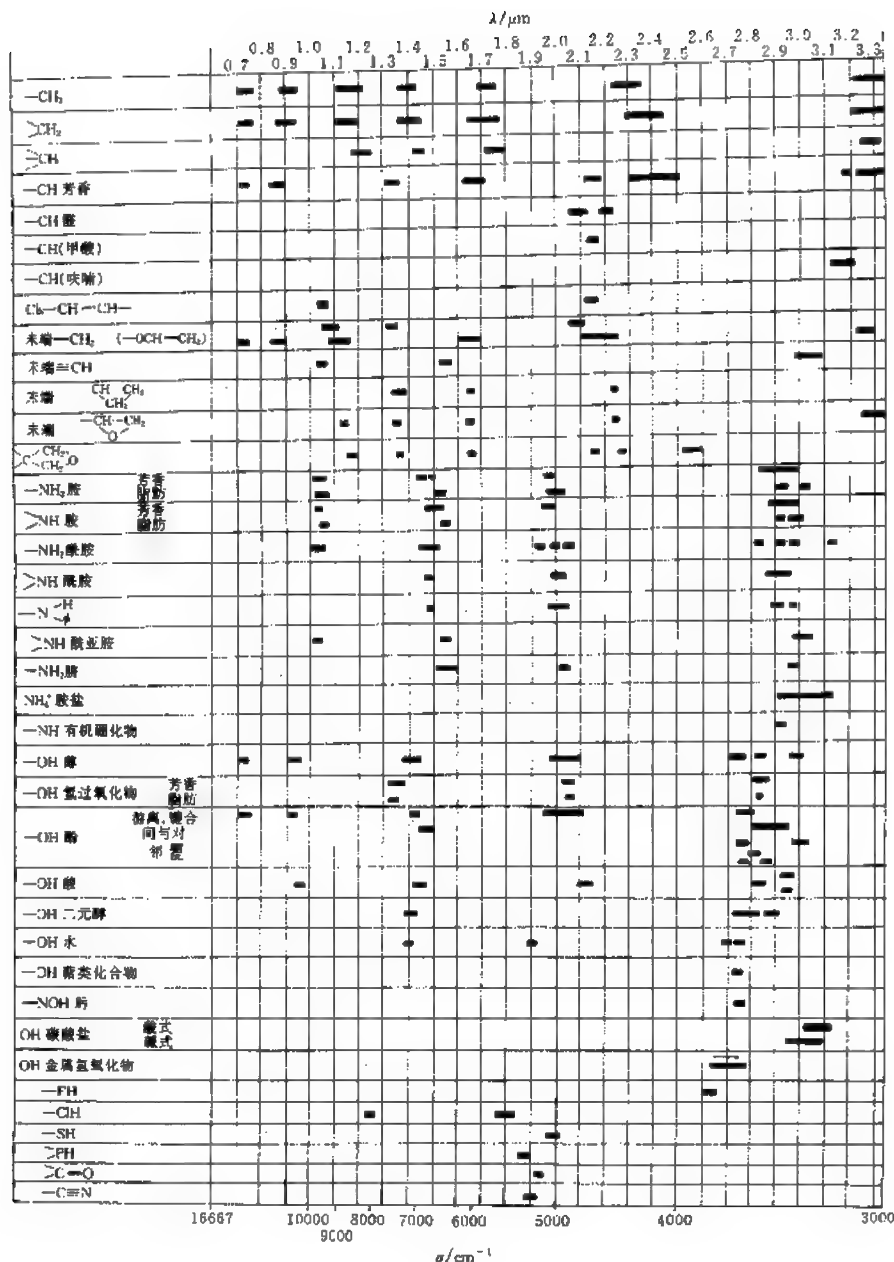


图 19-3　近红外谱带的相关图

表 19-56　一些主要基团的基频与倍频吸收谱带

基　团	振动方式	σ/cm^{-1}			λ/nm				
		基频	一级倍频		基频	一级倍频		二级倍频	
			理论	实际		理论	实际	理论	实际
CH_3	不对称伸缩振动	2952～2972	5904～5944	5824～5787	3385～3365	1692～1682	1728～1717	1128～1122	1164～1156
	对称伸缩振动	2862～2882	5724～5764	5609～5649	3494～3470	1747～1735	1783～1770	1165～1157	1200～1192
CH_2	不对称伸缩振动	2920～2930	5840～5860	5714～5754	3425～3413	1712～1707	1750～1738	1142～1138	1178～1170
	对称伸缩振动	2848～2858	5696～5716	5571～5612	3511～3499	1756～1750	1795～1782	1170～1166	1209～1200

续表

基团	振动方式	σ/cm⁻¹			λ/nm				
		基频	一级倍频		基频	一级倍频		二级倍频	
			理论	实际		理论	实际	理论	实际
═CH	伸缩振动	3010～	6020～	5900～	3322～	1661～	1695～	1108～	1142
$=CH_2$		3095	6190	5960	3231	1616	1687	1077	1130
═CH	伸缩振动	3250	6500	6497	3077	1538	1539	1026	1037
苯环 —H	伸缩振动	3050	6100	5938	3279	1639	1684	1093	1134
$R—NH_2$	不对称伸缩振动	3425	6850	6645	2920	1460	1505	973	1014
	对称伸缩振动	3350	6700	6536	2985	1493	1530	995	1030
R—NH	伸缩振动	3400	6800	6538	2941	1471	1531	980	1030
$Ar—NH_2$							1545～ 1509		986～ 1011
$CONH_2$	不对称伸缩振动	3520	7040	6901	2841	1421	1449	947	976
	对称伸缩振动	3400	6800	6685	2941	1471	1496	980	1007
H_2O	不对称伸缩	3756	7512		2662	1331		887	
	平均			6944			1440		960
	对称伸缩	3657	7314		2735	1368		912	
ROH		3610～ 3650	7220～ 7300	7042～ 7153	2770～ 2740	1385～ 1370	1420～ 1398	923～ 913	～949

表 19-57　在近红外区分析物质和基团的谱带及其来源

表中符号说明：

2×，3×　分别为一级倍频和二级倍频（振动频率为基频频率的 2 或 3 倍）；

str，def　分别为伸缩振动和变形振动；

Ar　为芳基；

sym，asym　分别为对称振动和不对称振动；

cis　为顺式结构；

amide Ⅰ（Ⅱ、Ⅲ）　分别为酰胺分子中羰基与胺基不同的偶合方式。

λ/nm	σ/cm⁻¹	振动方式	结构	λ/nm	σ/cm⁻¹	振动方式	结构
1360	7353	2×C—H str+C—H def	CH_3	2180	4587	2×amide Ⅰ+amide Ⅱ	蛋白质
1410	7092	2×O—H str	ROH	2200	4545	C—H str+C=O str	—CHO
1417	7057	2×C—H str+C—H def	苯环	2252	4440	O—H str+O—H def	淀粉
1430	6993	2×O—H str	$CONH_2$	2280	4386	C—H str+C—H def	CH_3
1440	6944	2×C—H str+C—H def	CH	2310	4329	C—H str+C—H def	CH_2
1450	6897	2×O—H str	水，醇类	2336	4281	C—H str+C—H def	纤维素
1471	6798	2×N—H str	CONHR	2352	4252	3×C—H def	纤维素
1483	6743	2×N—H str	$CONH_2$	2461	4063	C—H str+C—C str	淀粉
1490	6711	2×N—H str（内氢键）	$CONH_2$	2500	4000	C—H str+C—C str	淀粉
1492	6702	2×N—H str	$ArNH_2$	1395	7168	2×C—H str+C—H df	CH_2
1510	6623	2×N—H str	蛋白质	1415	7067	2×C—H str+C—H df	CH_2
1520	6579	2×N—H str	$CONH_2$	1420	7042	2×O—H str	ArOH
1530	6536	2×N—H str	RNH_2	1440	6944	2×O—H str	醣类
1540	6494	2×O—H str（内氢键）	淀粉	1446	6916	2×C—H str+C—H df	苯环
1580	6329	2×O—H str（内氢键）	淀粉	1460	6849	2×N—H str	$CONH_2$
1645	6079	2×C—H str	R—CH—CH	1480	6757	2×O—H str	葡萄糖
1685	5935	2×C—H str	Ar	1490	6711	2×N—H str	CONHR
1705	5805	2×C—H str	CH_3	1490	6711	2×O—H str	纤维素
1740	5747	2×S—H str	—SH	1500	6667	2×N—H str	NH
1780	5618	2×C—H str	纤维素	1520	6579	2×O—H str	ROH
1900	5051	O—H str+2×C—O str	淀粉	1528	6545	2×O—H str（内氢键）	淀粉
1908	5241	2×O—H str	ROH	1533	6523	2×C—H str	═CH
1940	5155	O—H str.+O—H def	H_2O	1570	6370	2×N—H str	CONH
1960	5102	N—H asym. str+amide Ⅰ	CONH	1620	6173	2×C—H str	$=CH_2$
2000	5000	2×O—H def+C—O def.	淀粉	1660	6024	2×C—H str	cis—RCH═CHR
2030	4926	3×C═O str	$CONH_2$	1695	5900	2×C—H str	CH_3
2050	4878	N—H asym str.+amide Ⅱ	$CONH_2$	1725	5797	2×C—H str	CH_2
2100	4762	2×O—H def.+2×C—O str	淀粉	1765	5666	2×C—H str	CH_2
2132	4690	N—H str+C═O str	氨基酸	1820	5495	O—H str+2×C—O str	纤维素
2150	4651	2×amide Ⅰ+amide Ⅱ	$CONH_2$	1900	5263	3×C═O str	—COOH

续表

λ/nm	σ/cm⁻¹	振动方式	结构	λ/nm	σ/cm⁻¹	振动方式	结构
1920	5208	2×C=O str	CONH	2190	4566	CH_2 asym str+C=str	HC≡CH
1950	5128	3×C=O str	—COOR	2242	4460	N—H str+NH_3 def	氨基酸
1980	5051	N—H asym str+amide Ⅰ	蛋白质	2276	4394	O—H str+C—C str	淀粉
2000	5000	N—H sym str+amide Ⅱ	$CONH_2$·CONHR	2294	4359	N—H str+C=O str	氨基酸
2050	4878	N—H sym str+amide Ⅱ	蛋白质	2323	4305	C—H str+C—H def	CH_2
2080	4808	O—H str.+O—H def	ROH	2347	4261	CH_2 sym str+=CH_2 def	$HC≡CCH_2$
2110	4739	N—H sym str+amide Ⅱ	$CONH_2$·CONHR	2380	4202	3×O—H def	ROH
2140	4673	=C—H str.+C=C str	HC≡CH	2488	4019	C—H str+C—C str	淀粉
2160	4630	2×amide Ⅰ+amide Ⅱ	CONHR				

六、有机化合物远红外吸收频率[2]

表 19-58 一些有机化合物的远红外区吸收

化合物	吸收频率 σ/cm⁻¹
烷烃	
正烷烃	540～460（弱）、460～450（弱）
支化烷烃	570～480（变化）
单取代烷烃	565～540（中等）、435～425（中等）
二取代烷烃	555～535（强）
3，3二取代	510～505（中等）
2，2二取代	495～490（中等）
烯烃	
n-R—CH═CH_2	635～630（强）、555～545（强）、455～425（弱）
R—CH(R)—CH_2—CH═CH_2	675～620（强）、550～530（弱）、465～420（弱）
R—C(R)═CH_2	540～510(强)、430～300以下（变化）
RHC═CHR（顺式）	700以上～675（强）、650～575（中等）、500～465（弱、宽）
RHC═CHR（反式）	无相关吸收带
R_2C═CHR	700～300（3～4个弱至中等吸收带）
n-R(H)C═C(H)CH_3（顺式）	580～575（强）、490～465（强）
n-R(H)C═C(H)CH_3（反式）	420～380(强)、325～300以下（强）
环烷烃	
环丙烷	540～500（变化）
烷基环丙烷	540～500（中等）、475～460（强）
环戊烷	580～490（强）
烷基环戊烷	580～530（强）
环己烷	555～430（变化）
芳烃	
取代苯	575～420（强）
单取代苯	575～440（强）
1，2二取代苯	480～425（强）
1，3二取代苯	460～425（强）
1，4二取代苯	550～460（强）
胺	410～345，335～320
酚	515～490（强）、440～360、340～320
1，2，4三取代苯	455～430（强）
1，3，5三取代苯	520～500（强）
萘	500～465
1-烷基萘	590～565(中等)、535～525(强)、495～465(强)、435～400（强）
2-烷基萘	630～610(中等)、475～465(强)、410～360（弱）
烷基四氢萘	600～560(中等)、460～425(强)
二甲基萘	640～615(变化)、420～385(强)
1，2-；1，3-等	550～525（中等～强）
2，3-；2，6-；2，7-	480～470（强）
联苯	625～615（强）、490～440（强）、410～390（中等）
2-烷基联苯	670～660(中等)、625～615(强)、575～520(强)、490～440（强）、410～395（中等）
3-烷基联苯	675～670（强）、625～615(强)、575～520(强)、460～440（强）、410～400（中等）
杂环化合物	
2取代吡啶	630～600(中等)、425～390(强)
3取代吡啶	640～610(中等)、410～385(强)
4取代吡啶	565～455（强）
溴代烷	
R—Br	665～500（强）
Br—CH_2CH_2—Br	645～630（强）、565～555（强）、440～430（弱）

续表

化合物	吸收频率 σ/cm^{-1}	化合物	吸收频率 σ/cm^{-1}
$R-CH_2-CH(Br)-CH_3$	635～585（强）、555～530（强）、365～350（变化）	酯	
		甲酸烷酯	640～610（弱、尖锐）
		乙酸烷酯	640～625（强）、610～600（强）、470～420（强）
$R-CH_2-C(R)_2-Br$	515～505（强）	脂肪酸	
		液体	675～600（强）、490～470（强）
$R-CH(R)-CH_2-Br$	555～545（强）、675～665（强）、510～465（强）	固体	700～660（强）、550～525（强）
		脂肪胺	
$R-CH(R)-CH_2CH_2Br$	665～645（强）、570～555（强）	伯胺	490～440（中等至强、宽）
		仲胺	440～415（弱、宽）
碘代烷		叔胺	550～420（弱至中等、宽）
$R-I$	605～475（强）	脂肪氨基酸	560～520（强）、440～410（强）、330～290
$R-CH_2CH_2I$	600～580（强）、505～495（强）	硝基烷烃	615～590（变化）
$R-CH_2-CH(I)-CH_3$	585～575（强）、440～435（很强）	烷基氰化物	580～525（变化）、390～360（强）
		有机金属化合物	
$R-CH_2-C(R)_2-I$	440～435（很强）	$R-Si-CH_3$	585～575（强）、570～560（强）、485～470（强）
		环硅烷（Si 上带两个 R）	650～630（中等）、500～475（强）
$R-CH(R)-CH_2I$	605～595（强）、590～580（强）、430～415（中等）	三茂铁	500～465（强、常常为双峰）
		有机磷化物	
$R-CH(R)-CH_2CH_2I$	600～585（很强）、515～505（强）、485～480（强）	$P-Cl$	600～450
		$P-S-C$	675～525
醚	550～500（强）	$P-O-R$	600～510
醇	470～420（弱）	$P-C$	510～400
酮		$P-OH$	625～460
脂肪酮	685～580（强）、550～515（强）、425～400（弱）	$P-C(=S)-H$	700～615
多氟酮	680～580（强）、550～515（强）、410～355（变化）		

第二节 红外光谱图

一、部分有机化合物的红外光谱图

本节提供了180个常见有机化合物的红外光谱图可供一般查找之用，但其主要目的还是希望读者结合本章第一节的官能团的红外光谱特征频率进一步了解光谱与结构之间的经验规律，从而能很好掌握红外光谱解析的基本知识和方法。

本节按化合物分类共分26类，其内容和谱图号见表19-59。

为使图面整齐划一、本节的红外光谱均取材于DMS："Working Atlas of Infrared Spectroscopy"（1972）。图中纵坐标为百分透光率（τ'），横坐标以波数（σ）等间隔作图，图的上方的标尺是波长（λ），在有些图的下方给出了部分吸收峰的位置。部分谱图提供不同的池厚的光谱图，其厚度标于图中。

表 19-59　部分有机化合物红外光谱图索引

内　　容	谱图号	内　　容	谱图号
1. 烷烃	19-4～19-6	15. 羧酸盐	19-107～19-108
2. 烯烃	19-7～19-8	16. 酰氯和过氧化物	19-109～19-112
3. 炔烃	19-9～19-10	17. 酰胺（包括酰亚胺）	19-113～19-118
4. 环烷烃	19-11～19-14	18. 异氰酸酯	19-119～19-120
5. 环烯烃	19-15～19-18	19. 脂肪硝基化合物	19-121～19-123
6. 芳烃	19-19～19-26	20. 芳硝基化合物	19-124～19-128
7. 卤代烃	19-27～19-34	21. 脂肪胺	19-129～19-137
8. 醇	19-35～19-39	22. 芳香胺	19-138～19-146
9. 醚（包括环醚）	19-40～19-43	23. 吡啶、氢化偶氮苯、联苯胺、氧化偶氮苯、芳腈、脂肪腈苯肼类	19-147～19-160
10. 酚	19-44～19-52		
11. 醛、酮和醌	19-53～19-65	24. 含硫化合物（硫醇、硫醚、二硫化物、亚砜、砜）	19-161～19-168
12. 酯	19-66～19-80		
13. 羧酸	19-81～19-102	25. 磺酰氯、磺酸、磺酰胺硫酸二甲酯	19-169～19-180
14. 羧酸酐	19-103～19-106	26. 硝酸酯	19-181～19-183

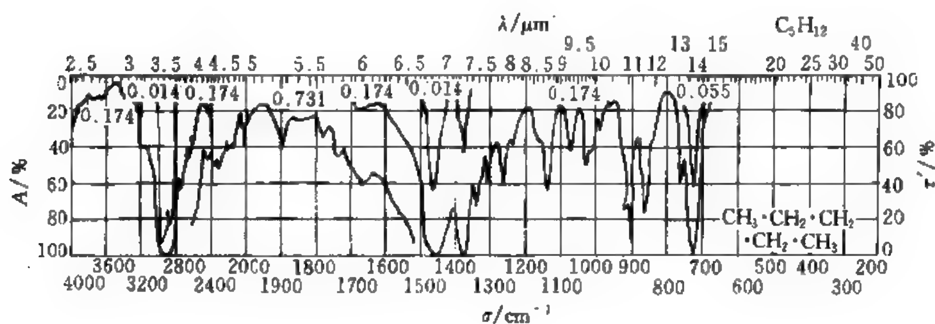


图 19-4　戊烷

～2940，2875，1464，1379，1342，907，861，730，726

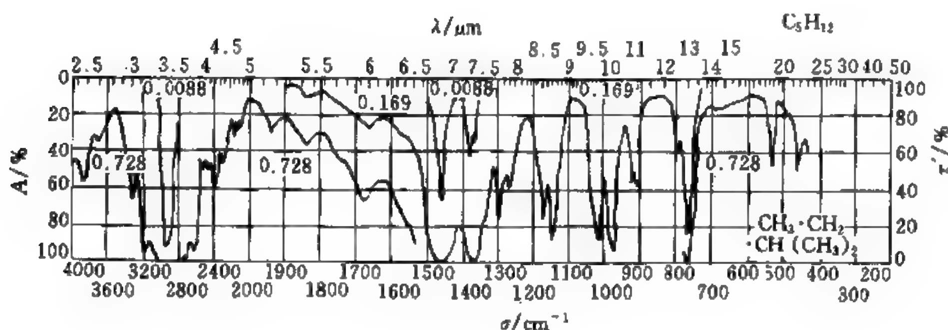


图 19-5　2-甲基丁烷

2960，2880，1462，1381，1368，1149，1014，974，764

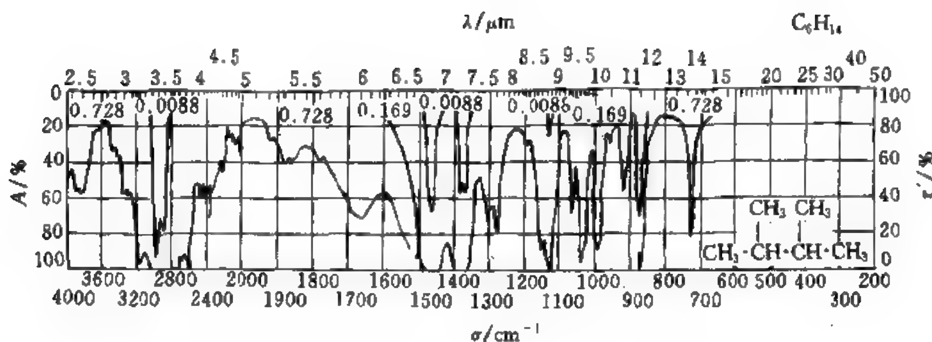


图 19-6　2，3-二甲基丁烷

2960，2880，1472，1381，1372，1153，1129，1038，991

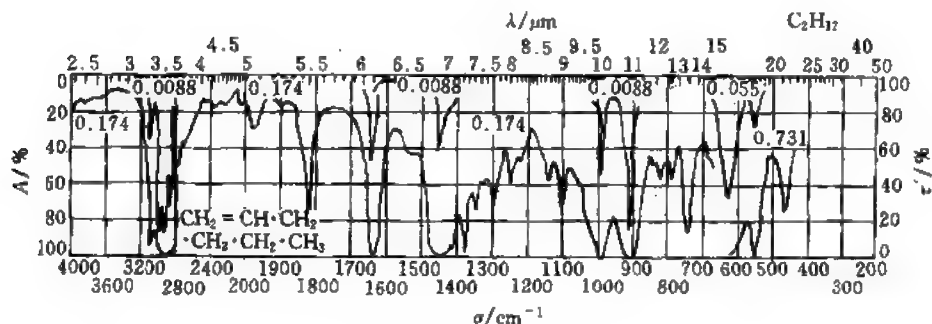


图 19-7　1-己烯

2967，2933，2878，2865，1642，1459，1453，1416，1379，993，910

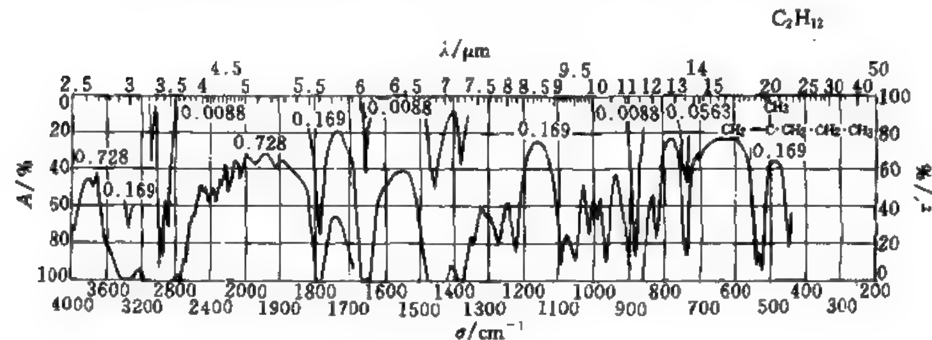


图 19-8　2-甲基-1-戊烯

3077，2967，2938，2878，1653，1458，1377，~888，539

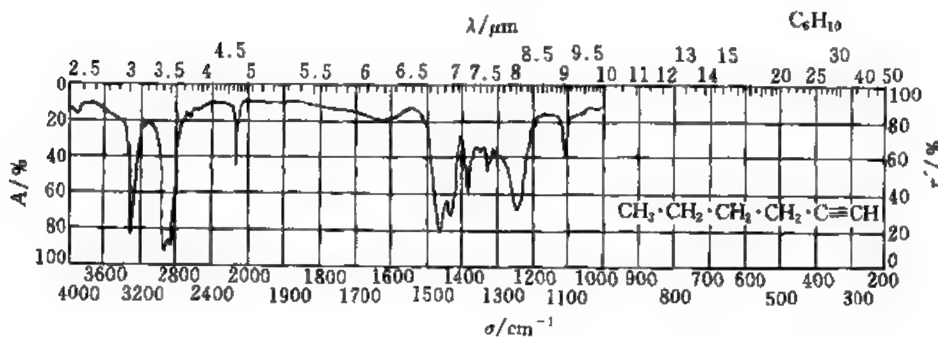


图 19-9　1-己炔

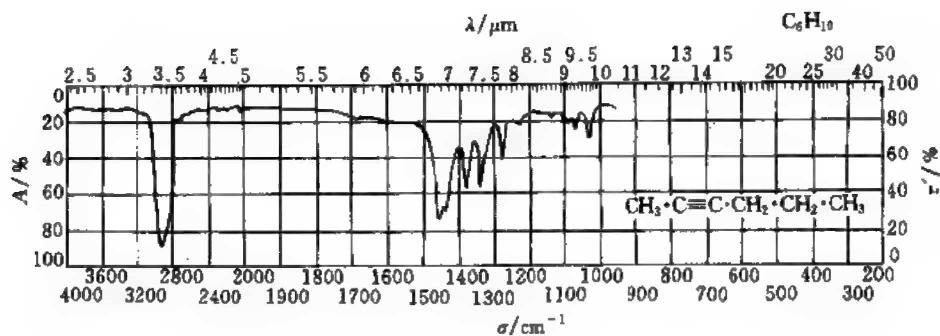


图 19-10　2-己炔

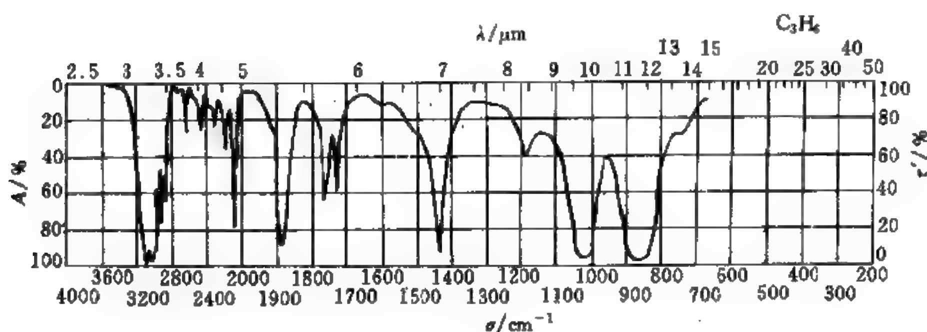


图 19-11　环丙烷

3090，3019，2933，2083，1887，1434，1024，866

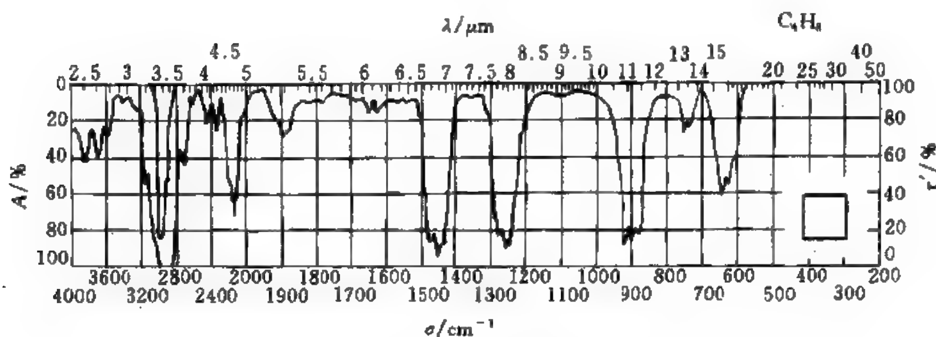


图 19-12　环丁烷

2974，2896，1471，1460，1433，1277，1261，1246，922，901，885

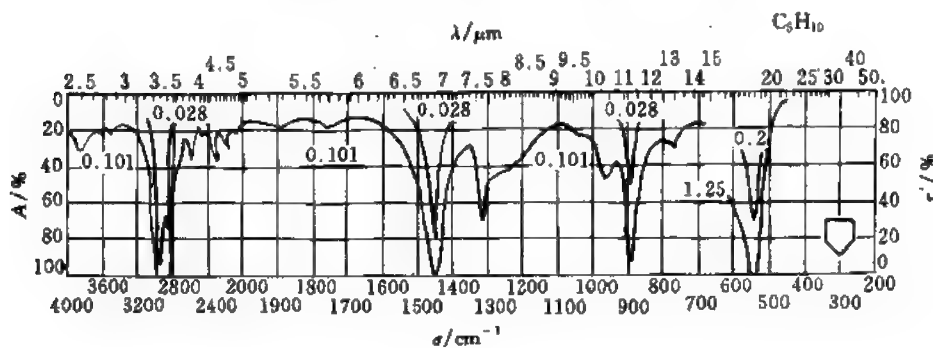


图 19-13　环戊烷

2951，2871，1455，1314，968，894，547

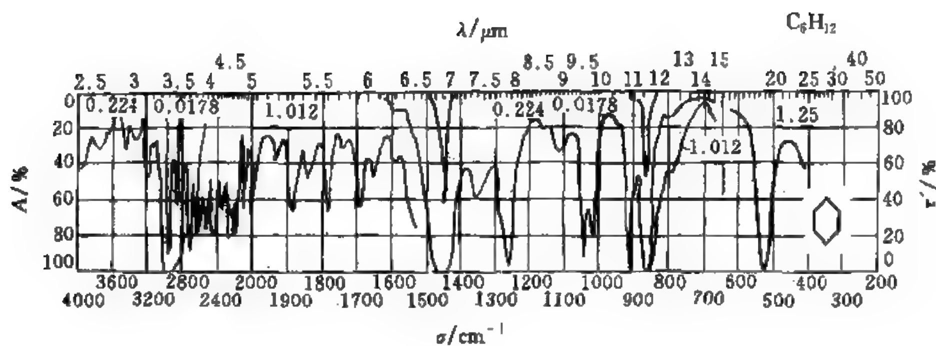


图 19-14　环己烷

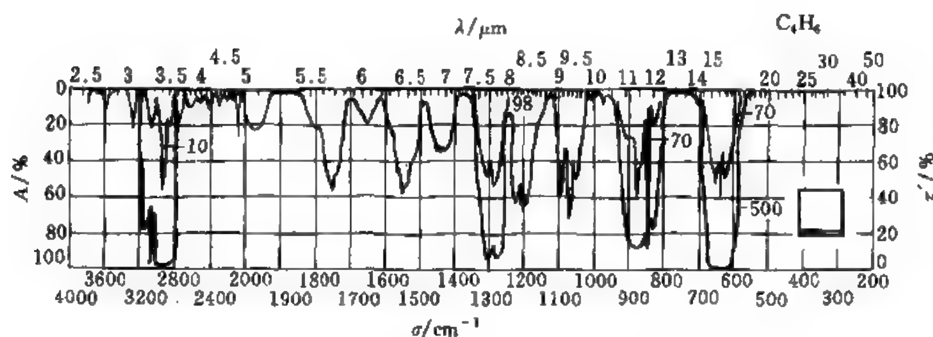


图 19-15　环丁烯

3060, 2955, ≈2850, 1304, ≈1295, 883, 846, 657, 640, 615

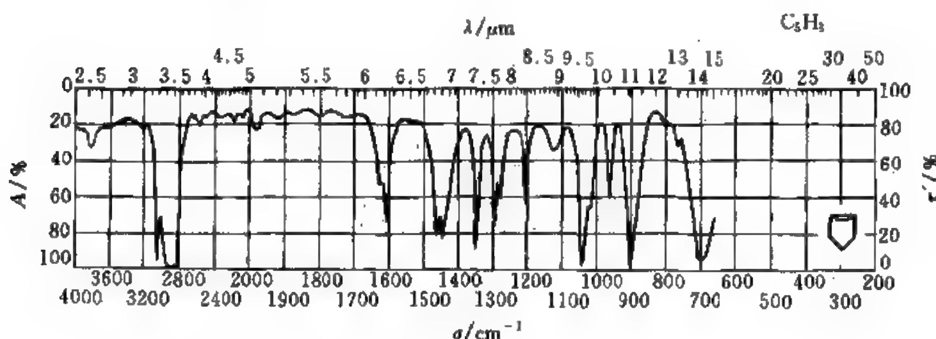


图 19-16　环戊烯

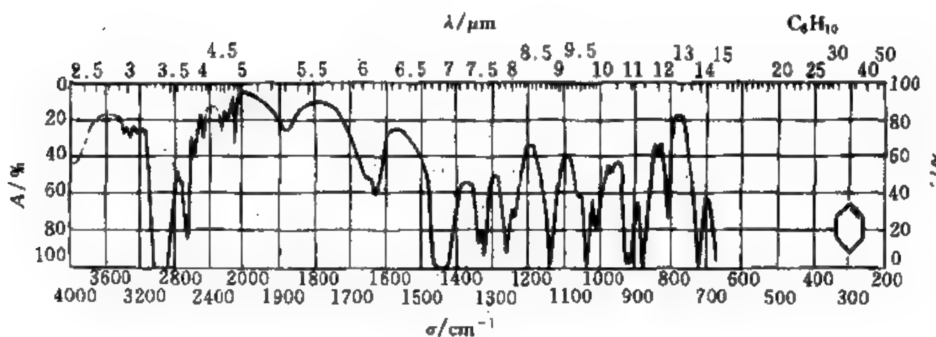


图 19-17　环己烯

3069, 1434, 1138, 1038, 916, 964, 876, 720

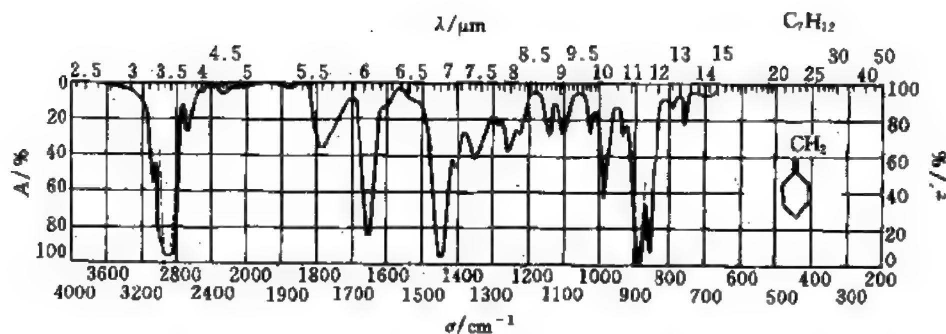


图 19-18　亚甲基环己烷

3070，2900，2850，1648，1445，985，879，856

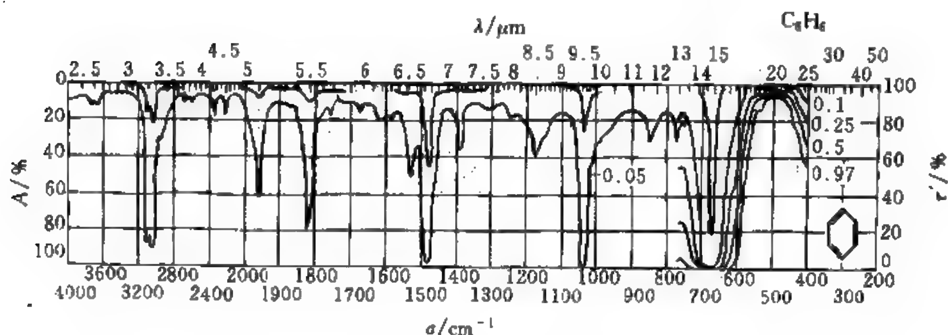


图 19-19　苯

3077，3039，1968，1818，1527，1479，1036，672

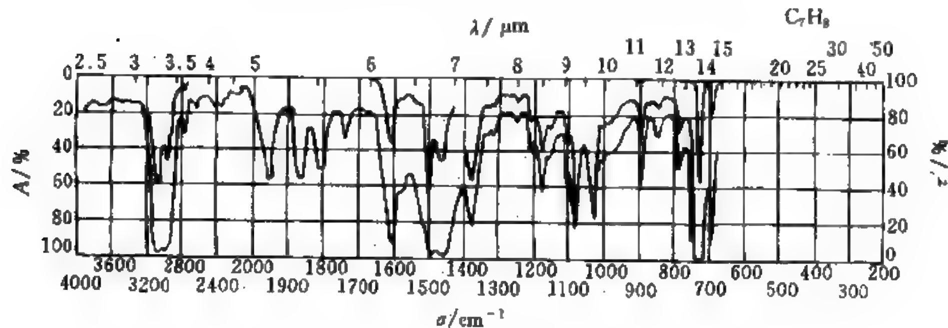


图 19-20　甲苯

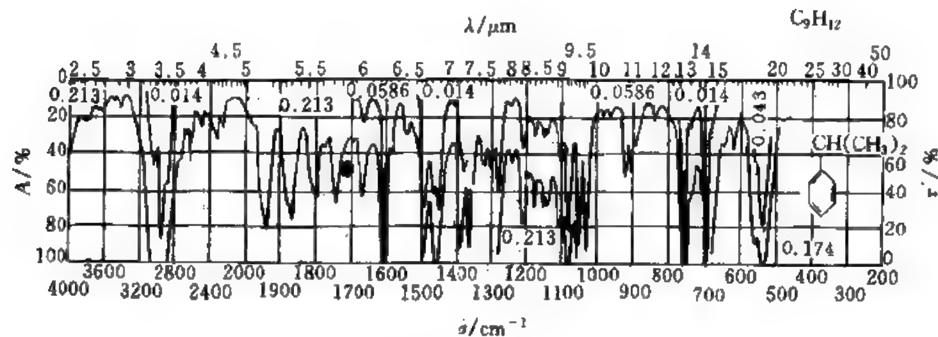


图 19-21　异丙基苯

2960，1605，1495，1468，1464，1385，1364，1081，1049，1028，759，698

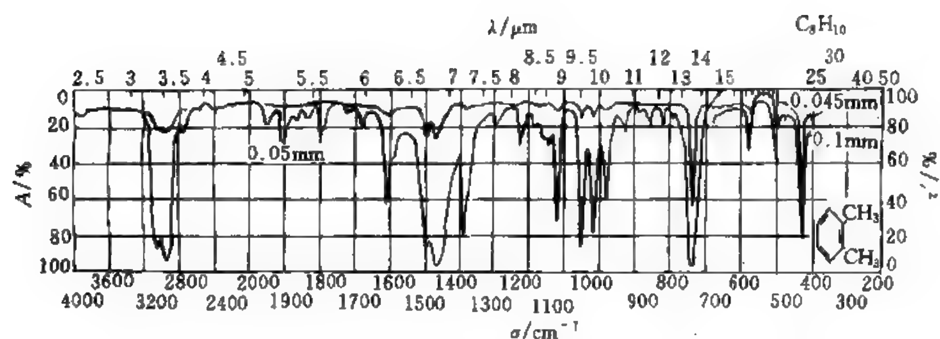


图 19-22 邻二甲苯

3080sh, 3030, 2950, 2882sh, 1613, 1498, 1453, 1445sh, 1053, 1021, 741[1]

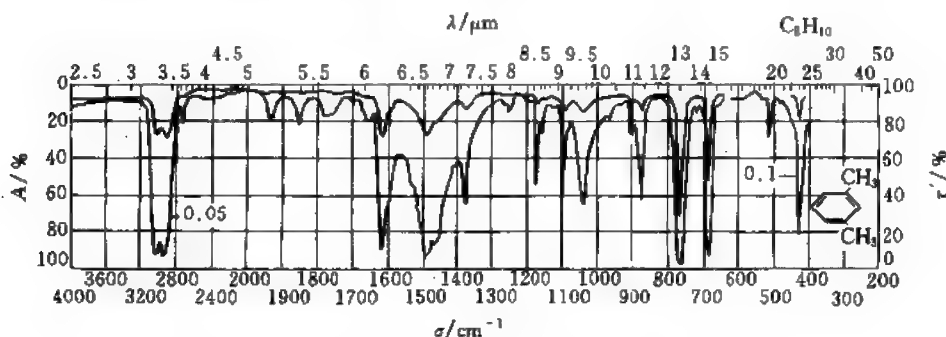


图 19-23 间二甲苯

3012, 2915, 1613, 1492, 1484sh, 1460, 769, 690, 433

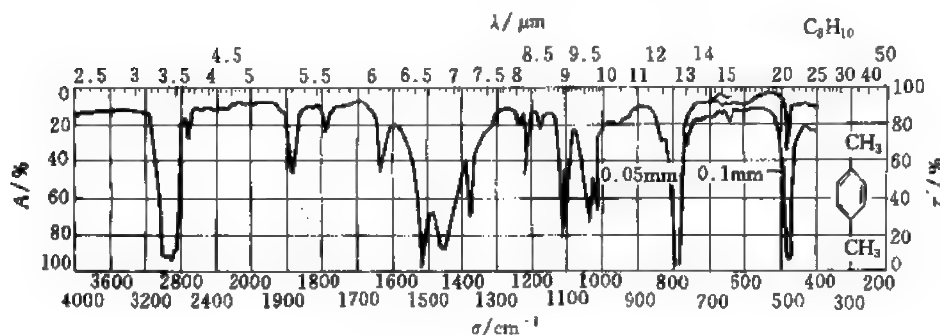


图 19-24 对二甲苯

2985, 2916, 2865sh, 1513, 1480sh, 1449, 1377, 1120, 1043, 1022, 796, 483

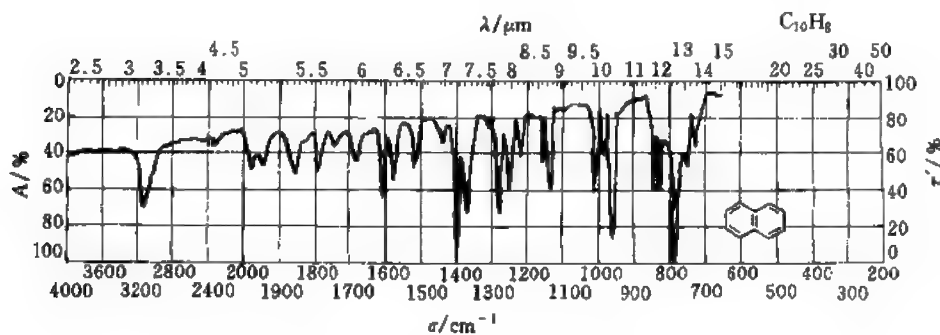


图 19-25 萘

3105, 1608, 1398, 1373, 1280, 1011, 965, 824, ≈791

[1] sh 代表肩峰。

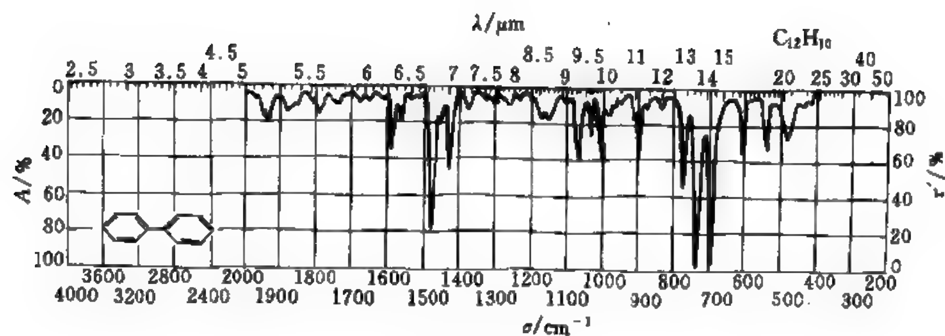


图 19-26 联苯

1480，1429，1072，1008，902，778，735，697

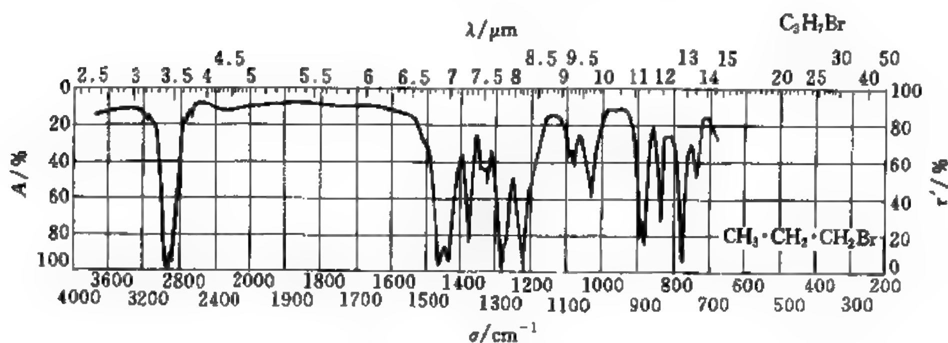


图 19-27 1-溴丙烷

2945，2870，1462，1434，1378，≈1284，1224，776

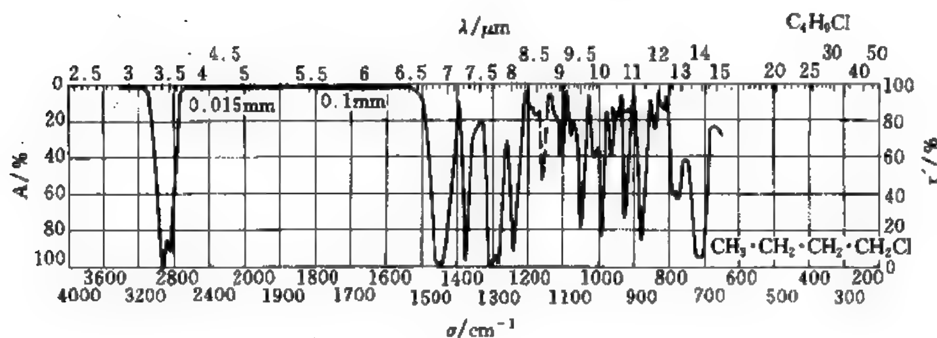


图 19-28 1-氯丁烷

2950，2930，2860，1450，1377，1310，1290，1245，720

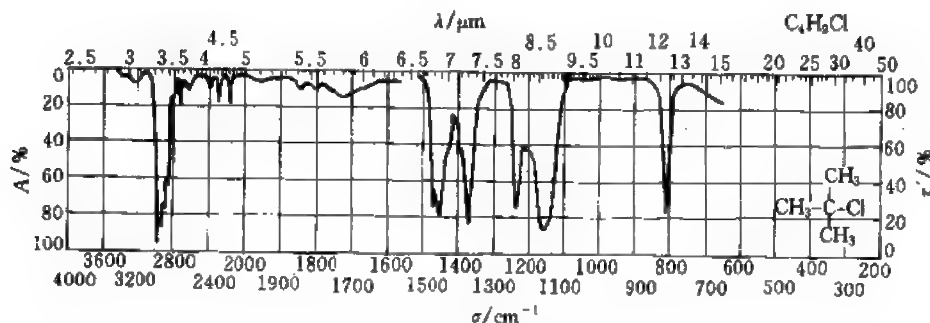


图 19-29 叔丁基氯

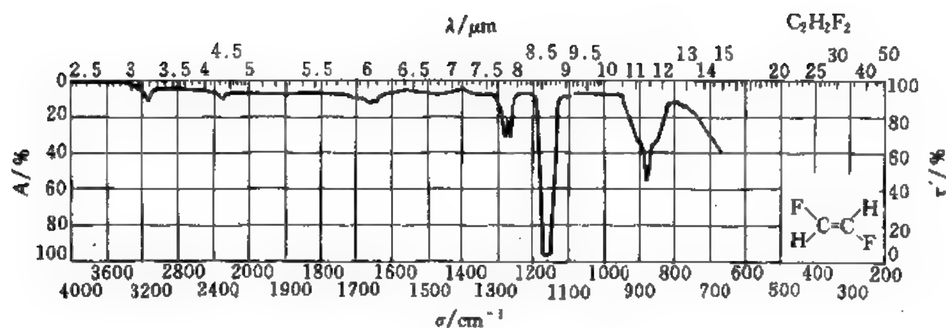


图 19-30　反式-1，2-二氟乙烯

1282，1264，1167，1150，890，874，872，855，851

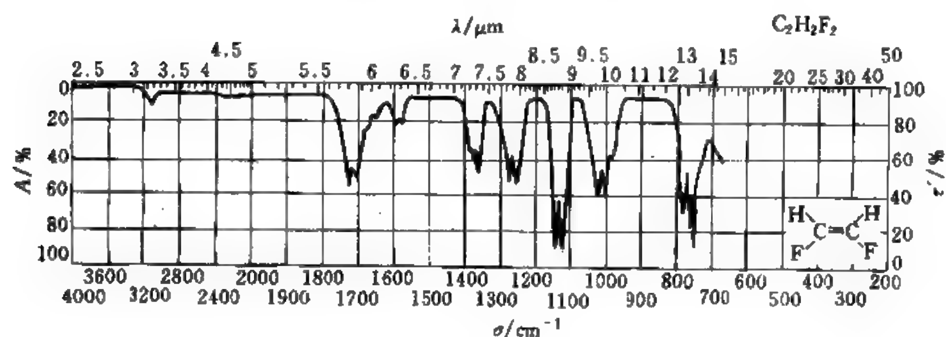
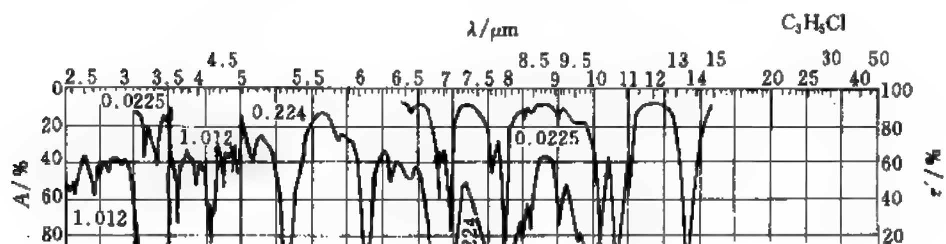


图 19-31　顺式-1，2-二氟乙烯

1724，1139，1127，1119，1024，1002，782，771，759



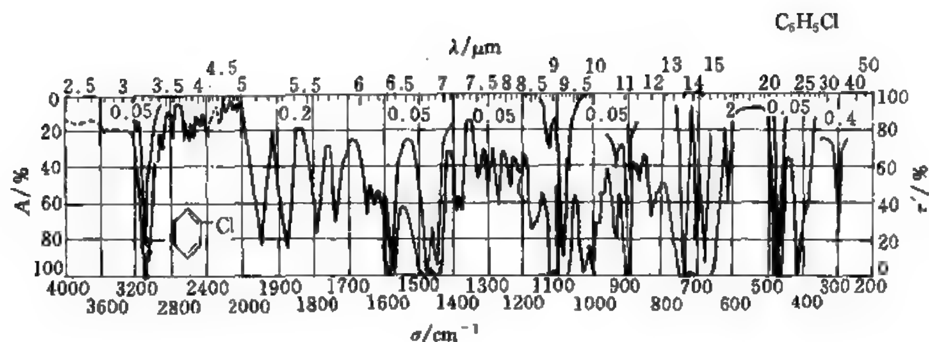


图 19-34　氯苯

3177，1580，1477，1445，1085，902，740，701，682，468

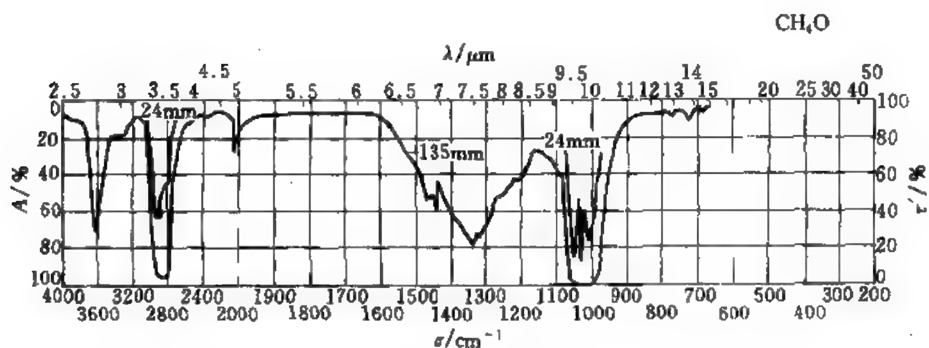


图 19-35　甲醇

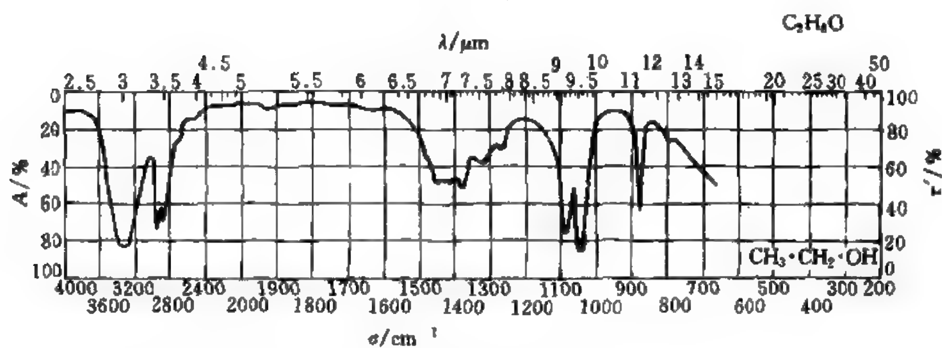


图 19-36　乙醇

3300，2925，2890sh，2840，1418，1381，1086，1047，881

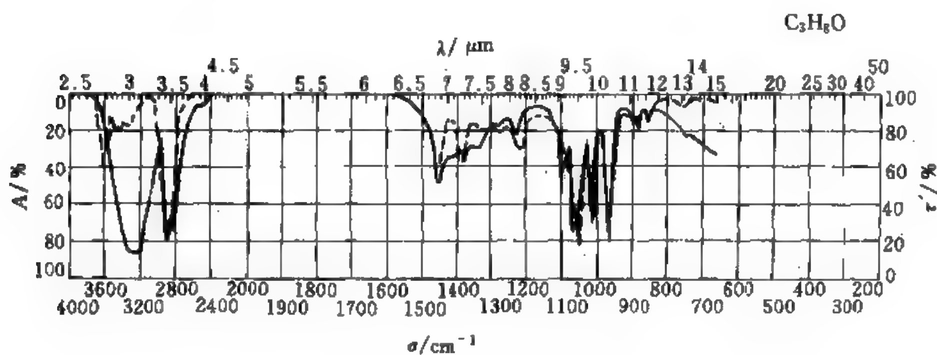


图 19-37　正丙醇

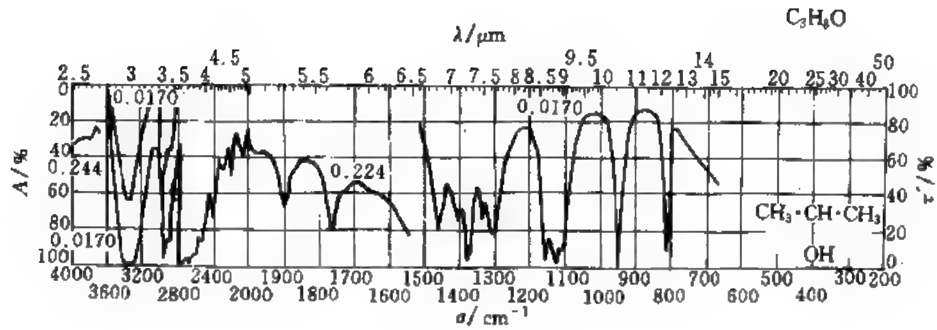


图 19-38 异丙醇

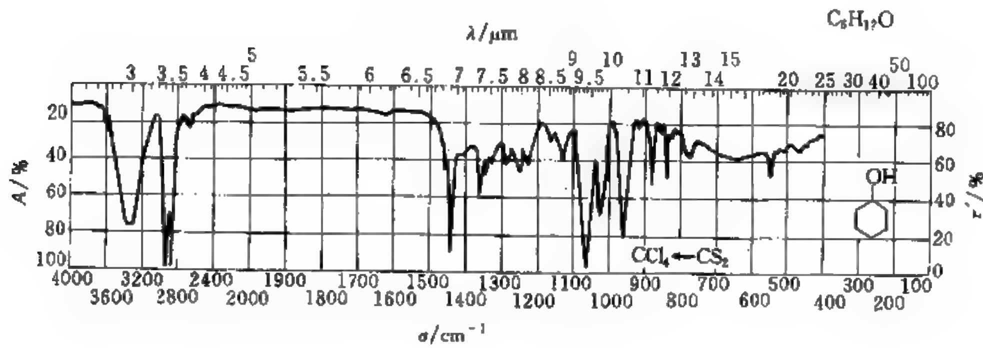


图 19-39 环己醇

3340, 2930, 2850, 1447, 1359, 1060, 1020, 964

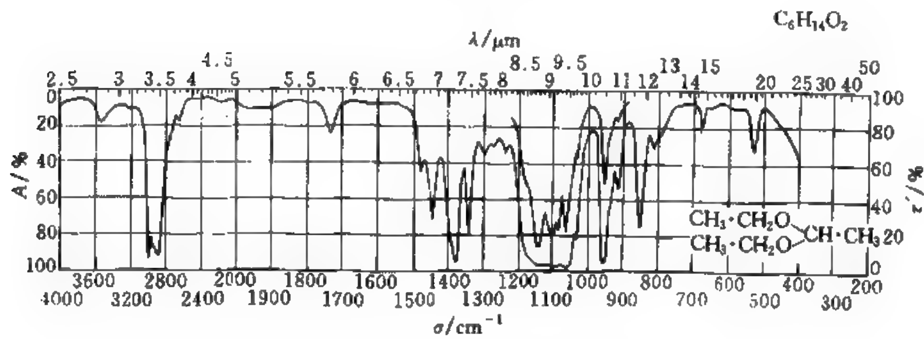


图 19-40 1，1-二乙氧基乙烷

2990, 2940sh, 2890, 1379, 1339, 1138, 1101, 1082, 1062, 1031, 952

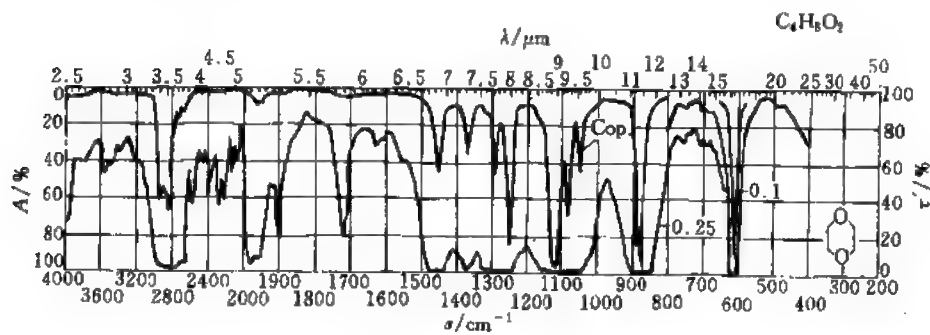


图 19-41 1，4-二氧六环

2967, 2857, 1256, 1122, 1083, 888, 874, 613

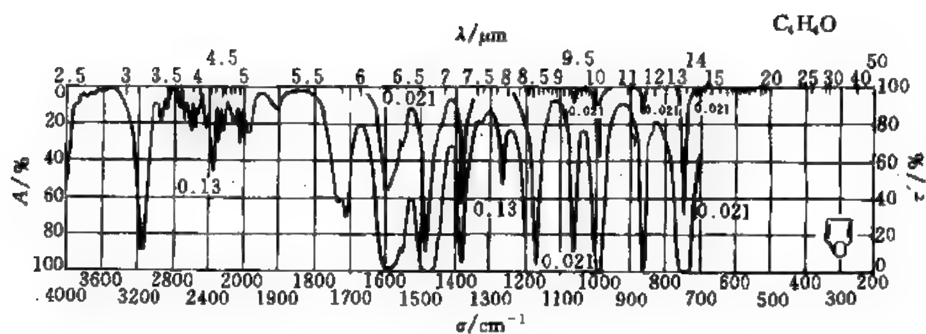


图 19-42　呋喃

1592, 1486, 1381, 1174, 1062, 991, 870, 744

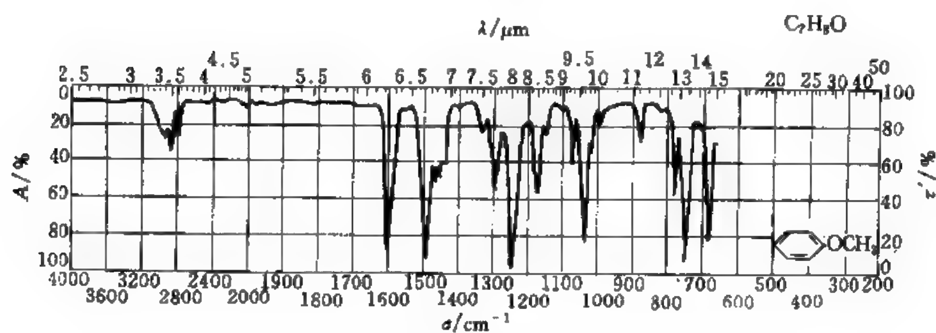


图 19-43　苯甲醚

1600, 1499, 1247, 1172, 1038, 782, 753, 690

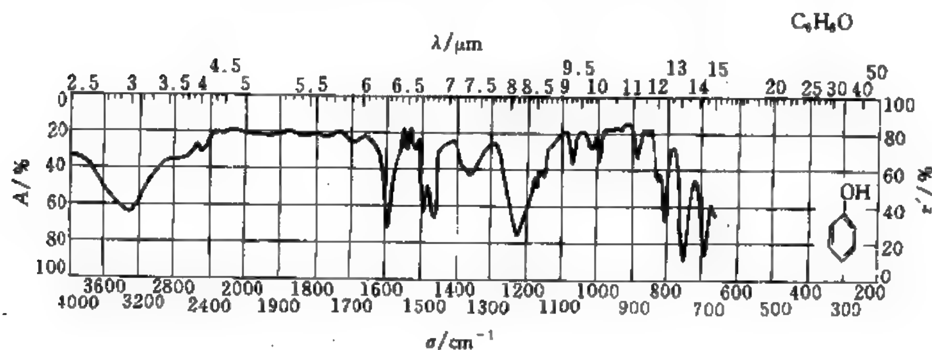


图 19-44　苯酚

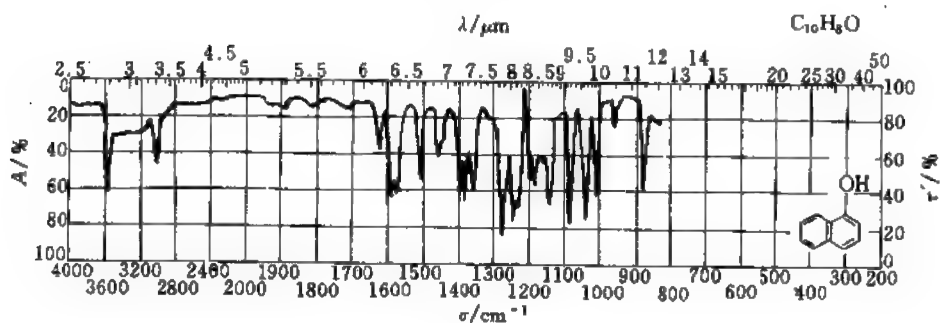


图 19-45　α-萘酚

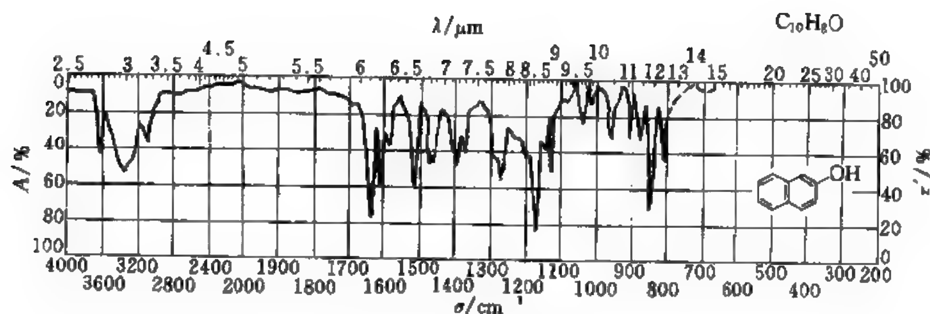


图 19-46 *β*-萘酚

3365, 1639, 1610, 1517, 1477, 1393, 1274, 1267sh, 1174, 1125, 847

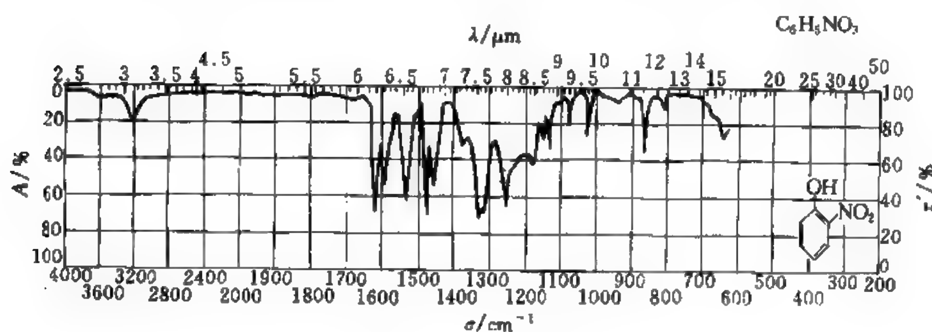


图 19-47 邻硝基酚

1620, 1593, 1536, 1479, 1457, 1331, 1320, 1258

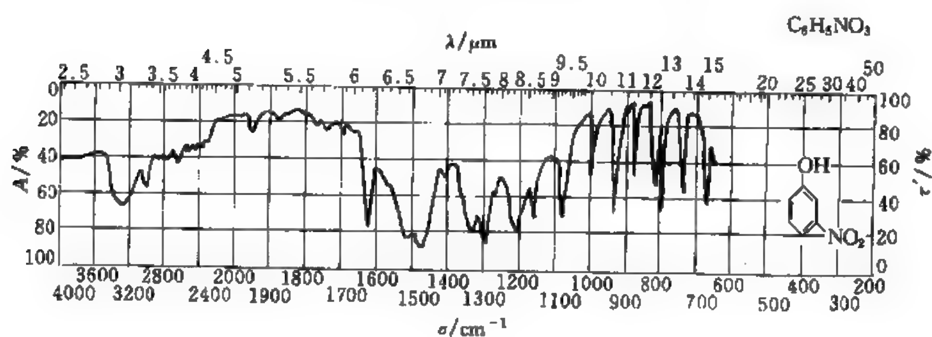


图 19-48 间硝基酚

1616, 1518, 1502sh, 1479, 1335, 1300, 1214, 1163, 1082, 1075, 933, 796

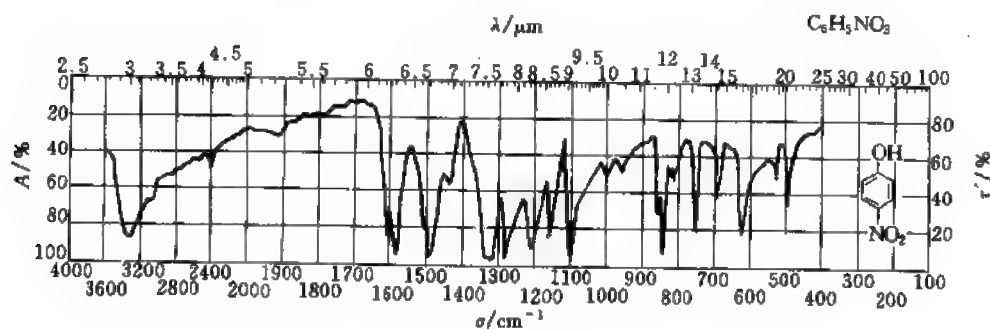


图 19-49 对硝基酚

3316, 1587, 1490, 1343, 1324, 1284, 1214, 1164. 1110, 850

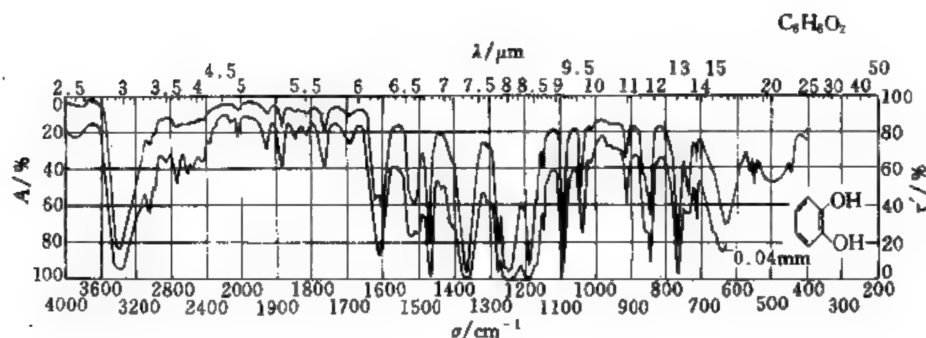


图 19-50 邻苯二酚

3413, 1471, 1362, 1279, 1253, 1242, 1185, 1094, 769

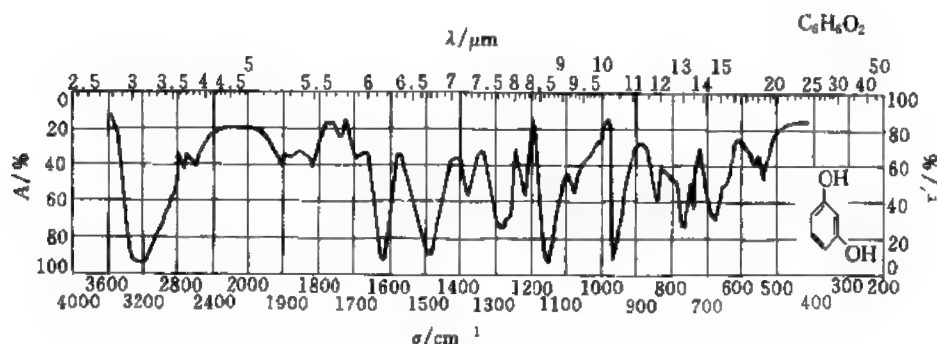


图 19-51 间苯二酚

3275, 1620, 1492, 1280, 1147, 962, 770

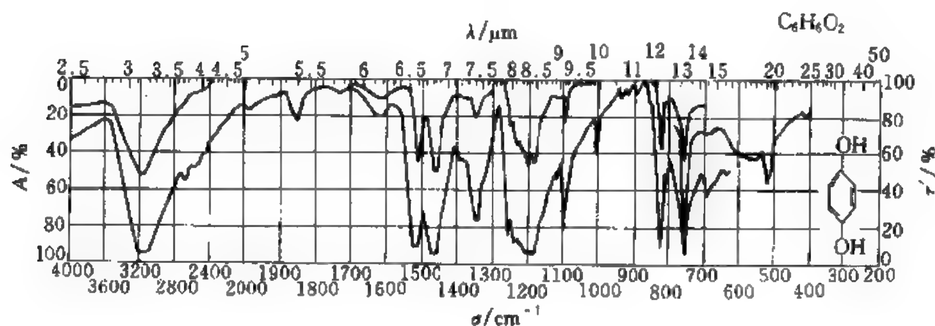


图 19-52 对苯二酚

3226, 1515, 1468, 1258, 1242, 1220sh, 1208, 1188, 830, 758

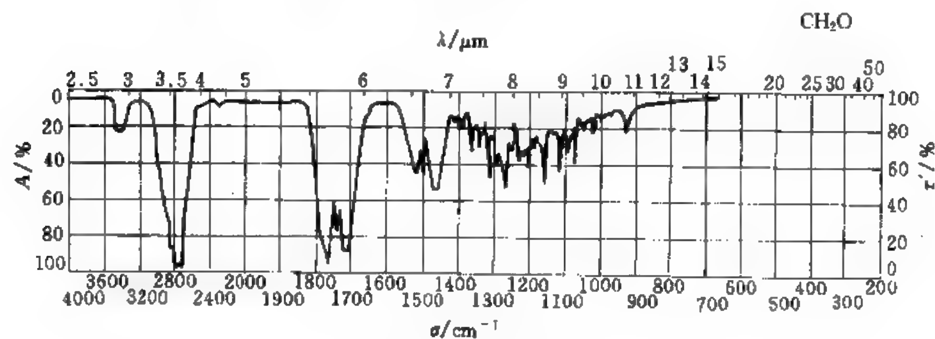


图 19-53 甲醛

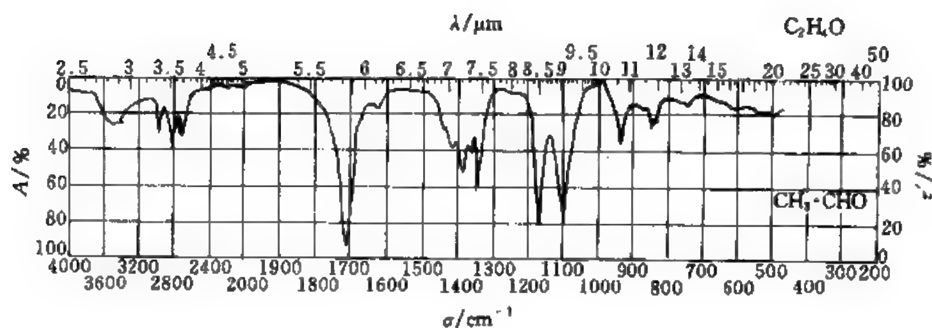


图 19-54　乙醛

2990, 2838, 1713, 1419, 1390, 1365, 1341, 1172, 1098, 941

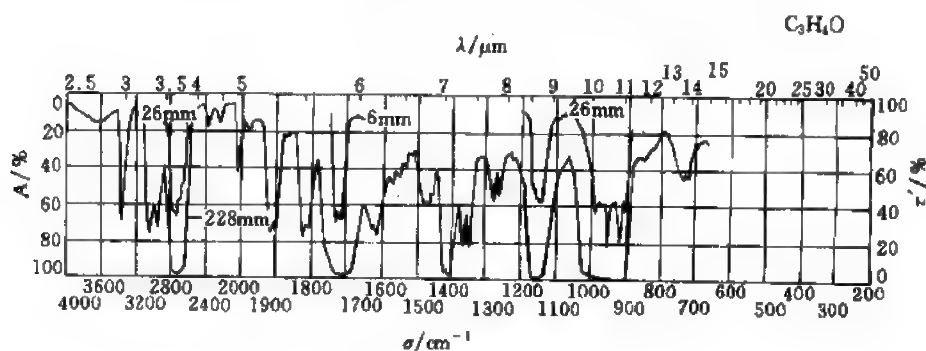


图 19-55　丙烯醛

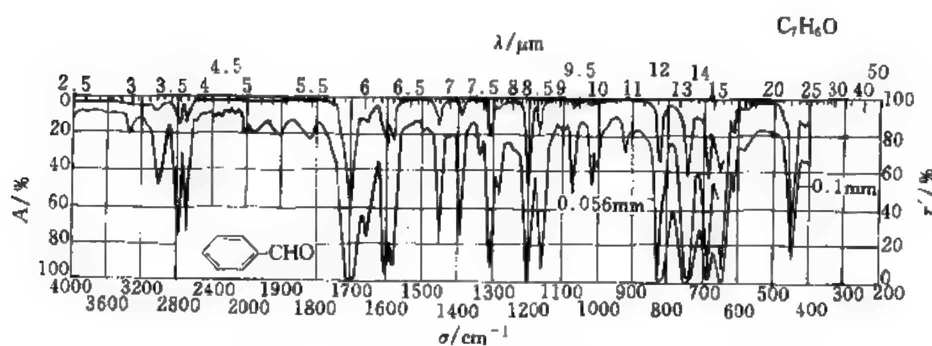


图 19-56　苯甲醛

1701, 1600, 1585, 1312, 1203, 1168, 828, 745, 637, 551

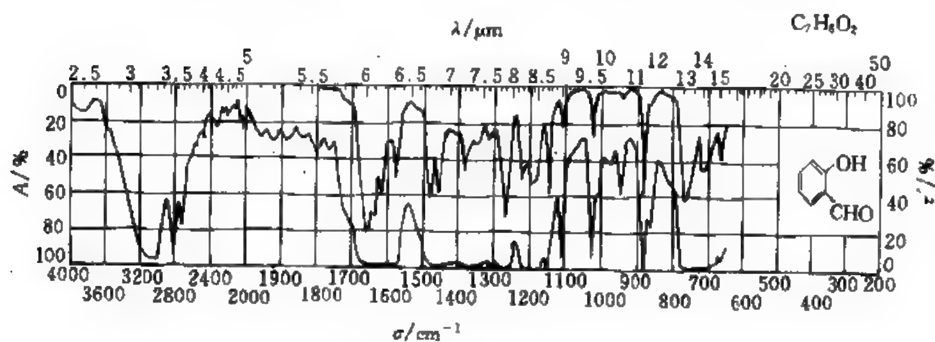


图 19-57　邻羟基苯甲醛

1661, 1642sh, 1616, 1484, 1458, 1276, 1227, 1200, 1188sh, 1149, 882, 766

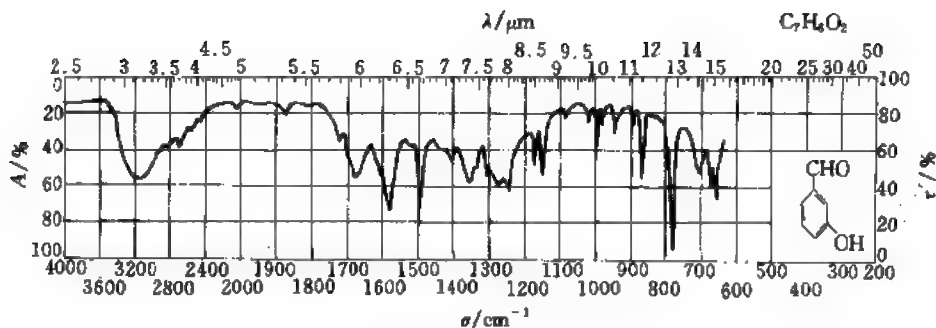


图 19-58 间羟基苯甲醛

1587，1499，1287，1248，782，677，659

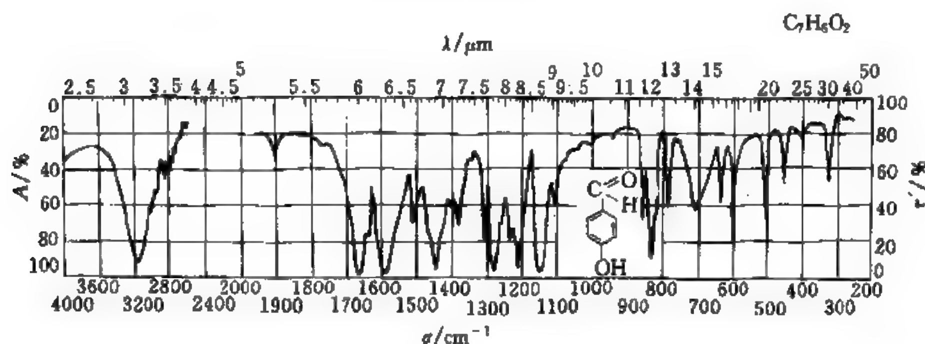


图 19-59 对羟基苯甲醛

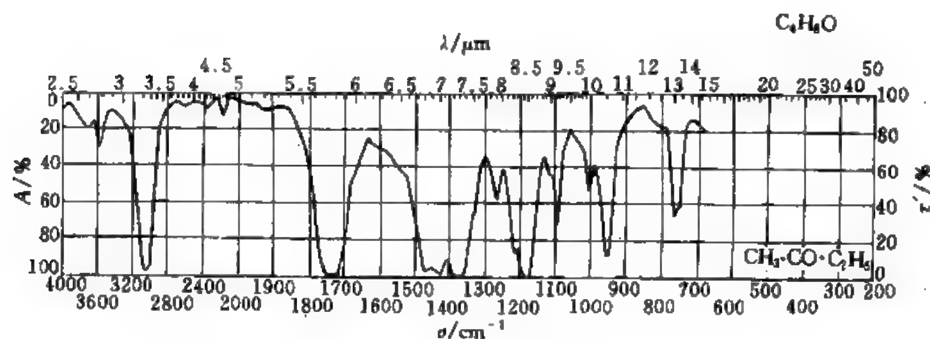


图 19-60 2-丁酮

≈3050，≈1727，1473，1429，≈1377，1215，≈1178，950

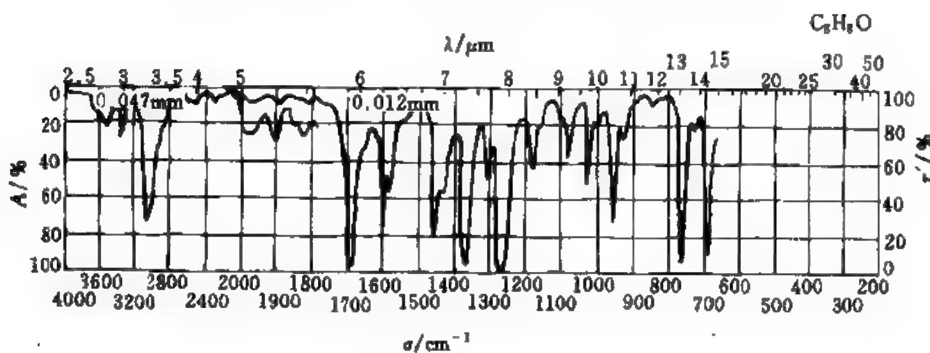


图 19-61 苯乙酮

≈3075，≈3020sh，1694，1606，1456，1364，1267，955，758，689

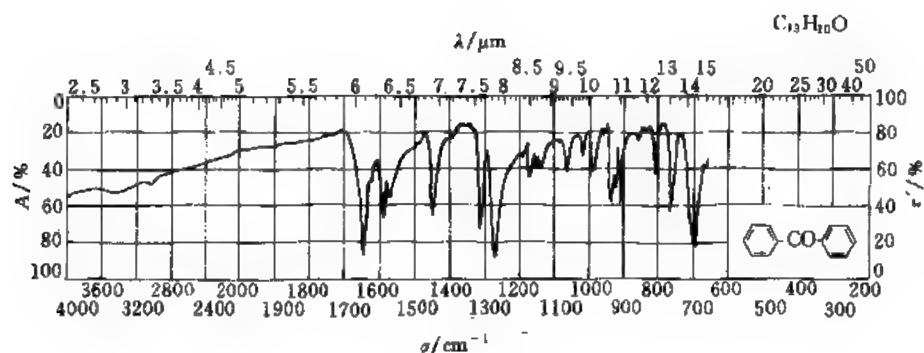


图 19-62 二苯酮

1646, 1590, 1443, 1313, 1271, 762, 702, 692

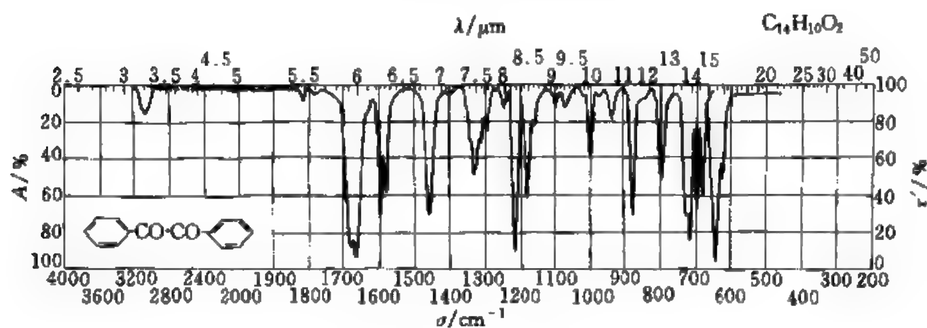


图 19-63 二苯基乙二酮

1682, 1664, 1600, 1458, 1217, 878, 725, 716, 696, 643

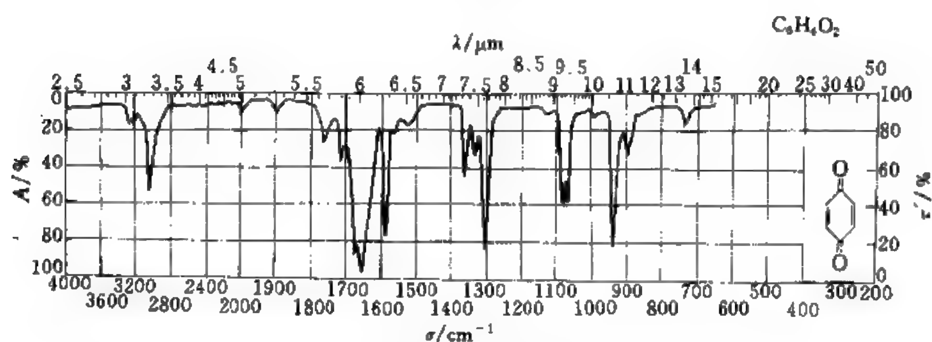


图 19-64 对苯醌

3063, 1679, 1658, 1593, 1369, 1310, 1084, 1074, 943

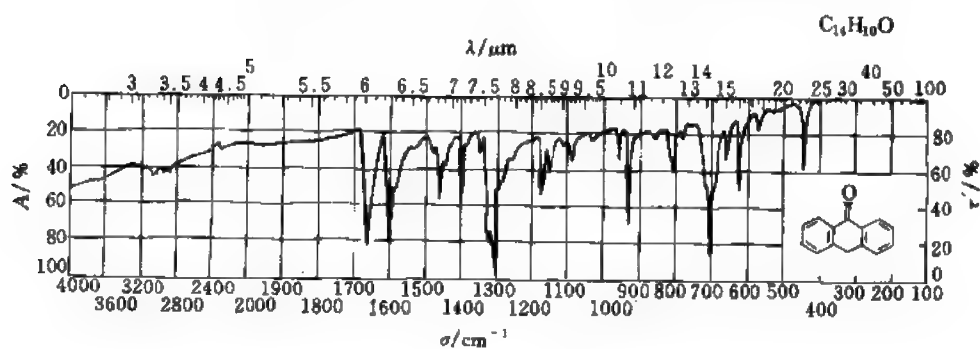


图 19-65 9-蒽酮

1653, 1596, 1460, 1399, 1320, 1308, 1170, 927, 705

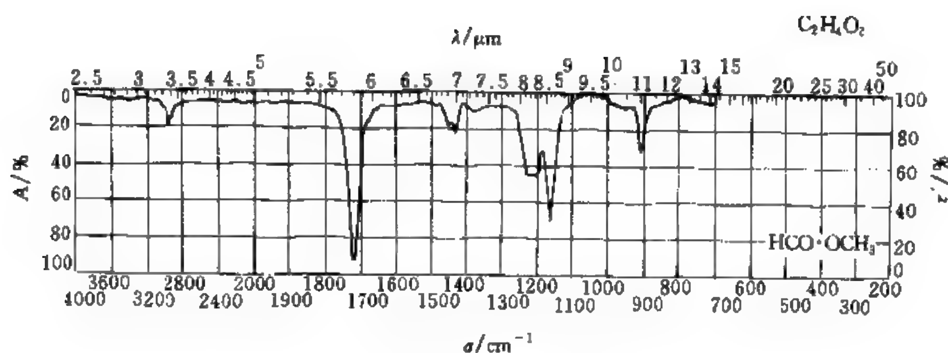


图 19-66　甲酸甲酯

1722，1436，1162，908

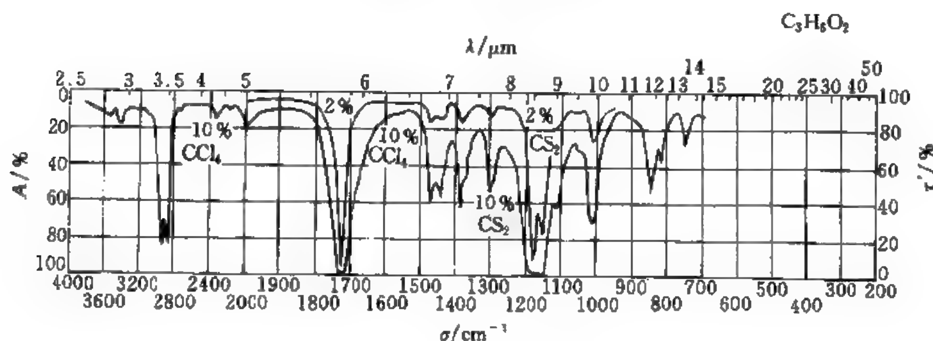


图 19-67　甲酸乙酯

2940，2880，1725，1386，1187，1154，1111，1010

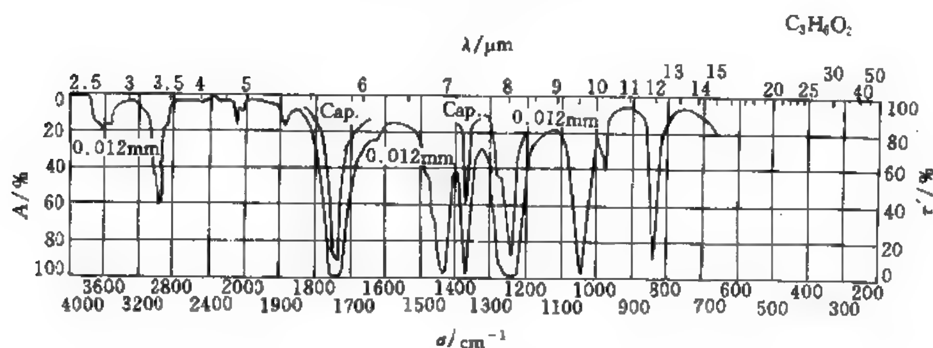


图 19-68　乙酸甲酯

≈1755sh，1744，1444，1374，≈1278sh，1246，1045，843

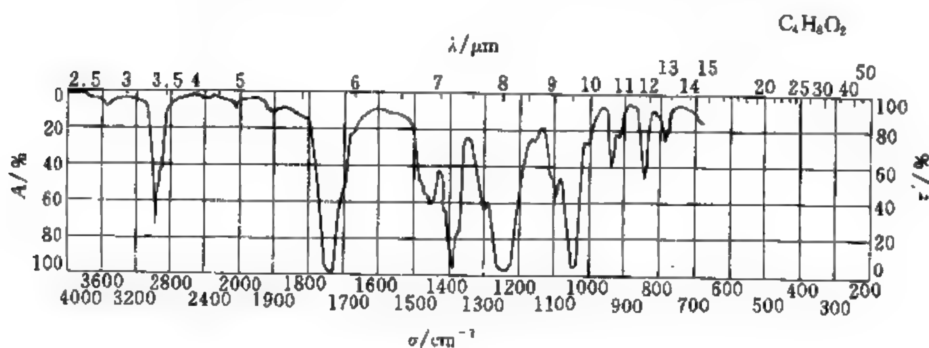


图 19-69　乙酸乙酯

3000，1745，1452，～1396，1375sh，1302，1240，1048

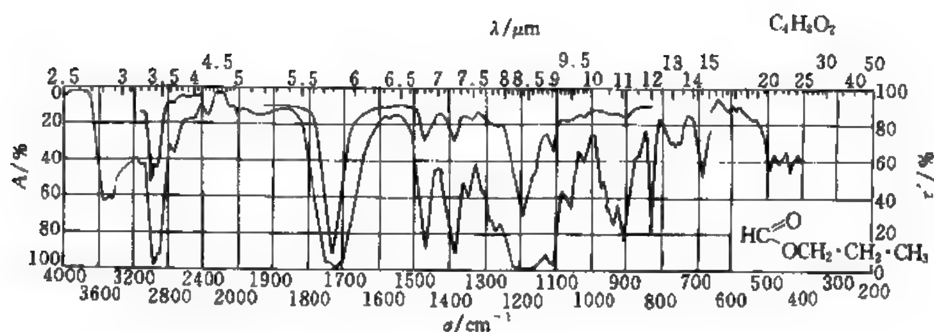


图 19-70 甲酸正丙酯

2967，2933sh，1727，1466，1379，1188，1146sh，1105，903，820

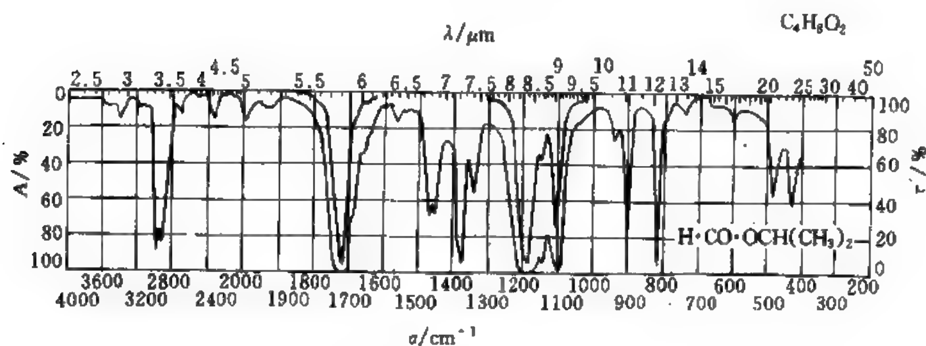


图 19-71 甲酸异丙酯

2980，2920，1724，1389sh，1377，1189，1146，1105，900，820

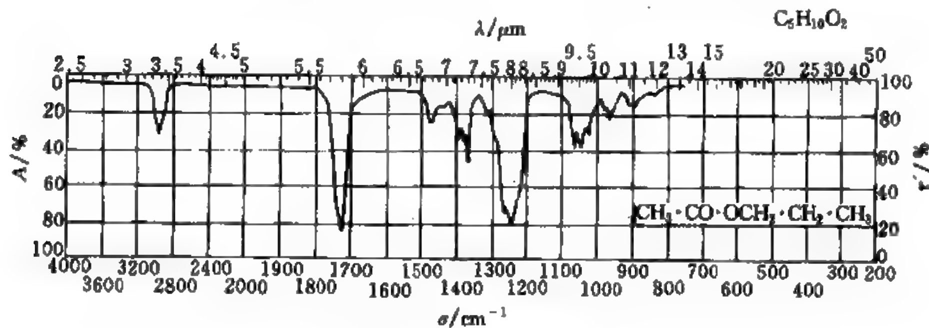


图 19-72 乙酸正丙酯

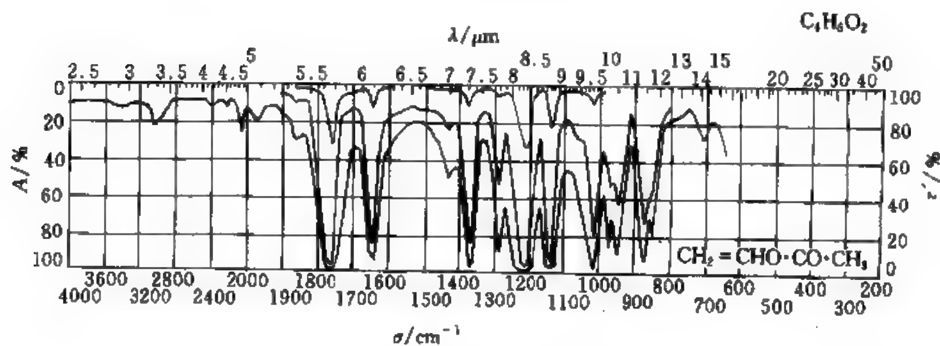


图 19-73 乙酸乙烯酯

1760，1645，1371，1215，1151sh，1136，1018，951，870

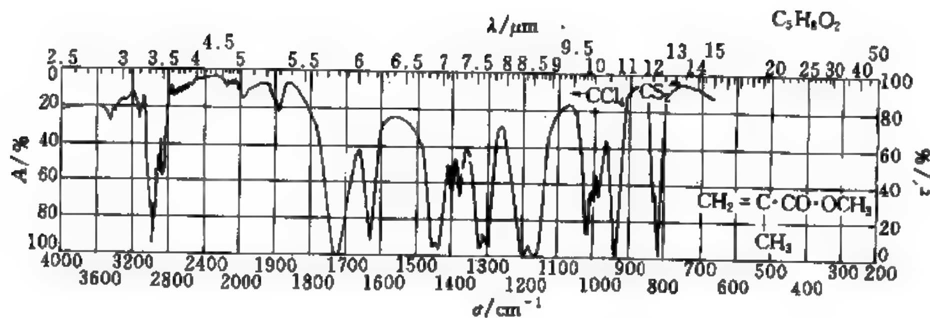


图 19-74　甲基丙烯酸甲酯

2958，1730，1440，1324，1197，1162，940，815

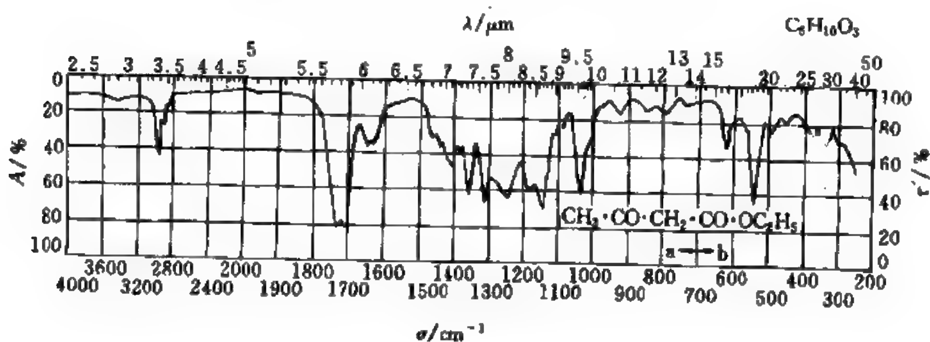


图 19-75　乙酰乙酸乙酯

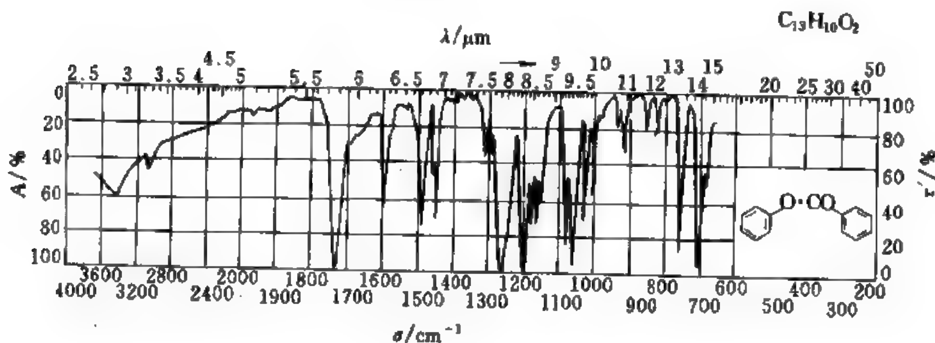


图 19-76　苯甲酸苯酯

1733，1265，1200，1081，1064，754，706，699，694sh

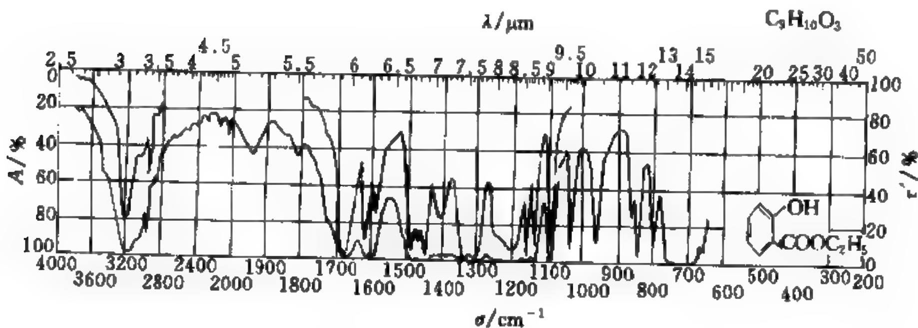


图 19-77　水杨酸乙酯

≈1675，1615，1487，1445，1335，1305，≈1200，1160，1136，1090

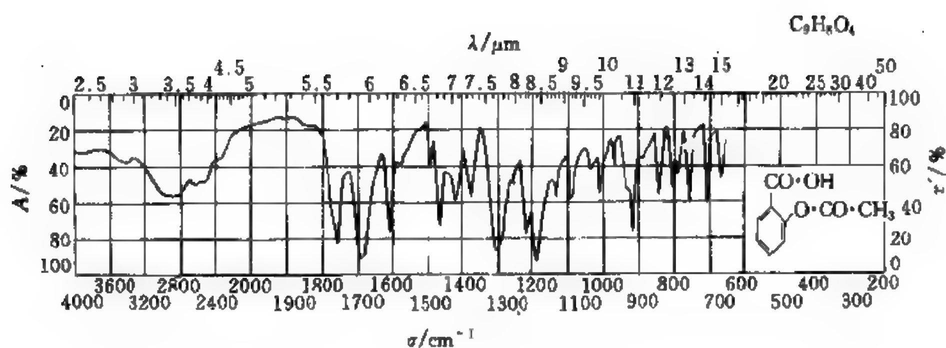


图 19-78 乙酰水杨酸

1755, 1689, 1608, 1459, 1304, 1219, 1186, 916

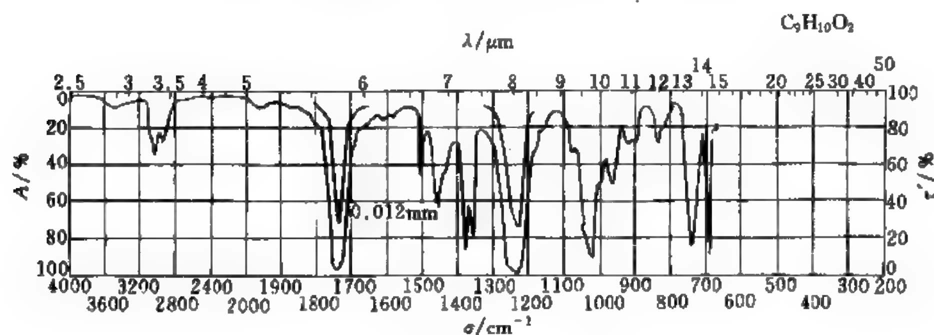


图 19-79 乙酸苄酯

1741, 1459, 1384, 1366, 1227, ≈1043sh, 1027, 748, ≈737sh, 696

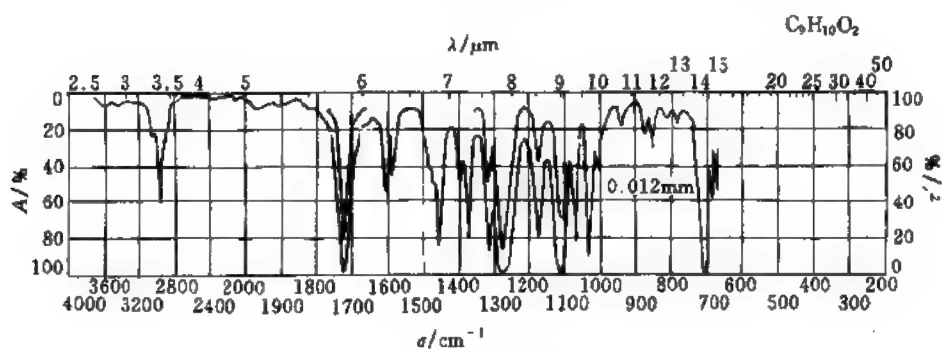


图 19-80 苯甲酸乙酯

1725, 1458, 1317, 1277, 1108, ≈1101sh, 1072, 1029, 709

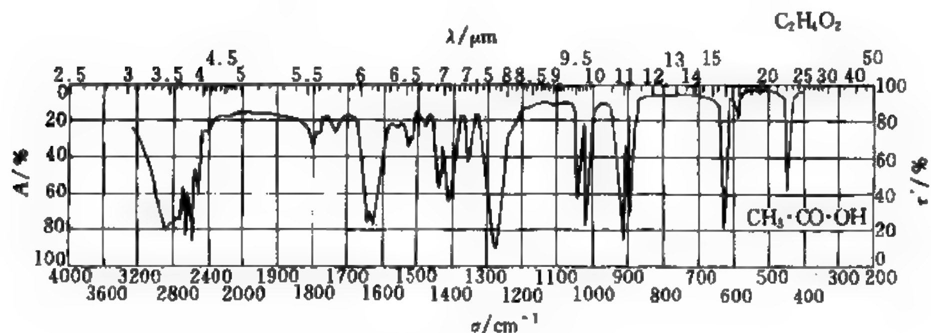


图 19-81 乙酸

2899, 2852, 2677, 2625, 1657, 1640, 1284, 1022, 923, 635

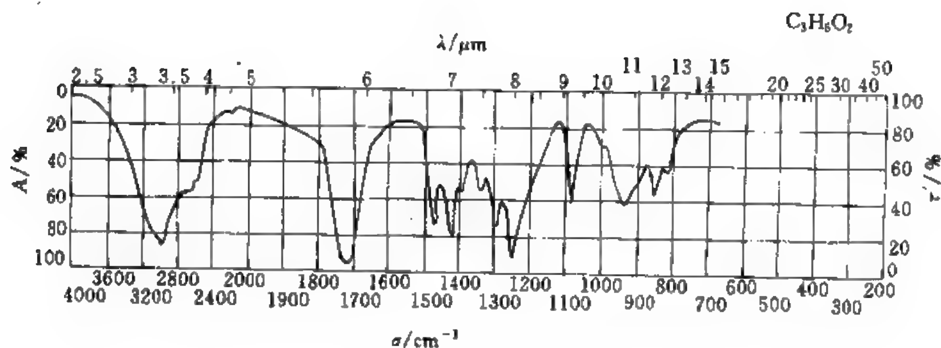


图 19-82 丙酸

2980, 1725, 1473, 1423, 1295, 1249, 1082, 939

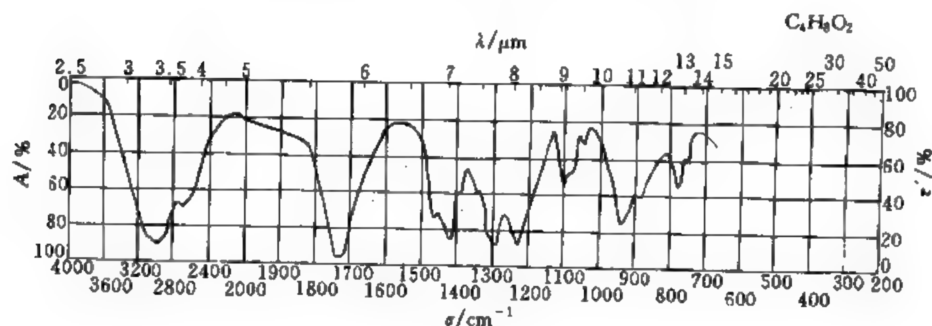


图 19-83 丁酸

≈3090sh, 2990, 2920sh, 1729, 1467, 1422, 1318sh, 1290, 1230, 937

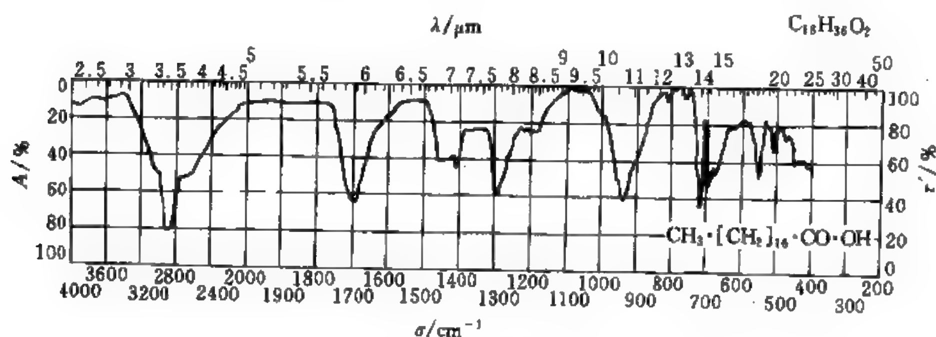


图 19-84 硬脂酸

2915, 2875, 1698, 1292, 937, 719

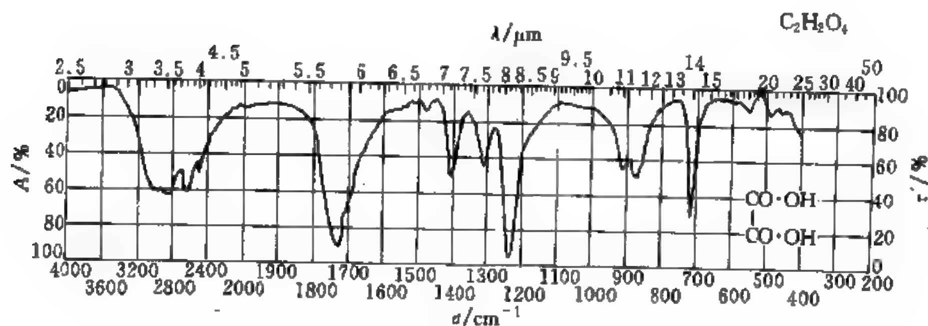


图 19-85 草酸

3100sh, 3000, 2890, 2860, 2655, 2505, 1730, 1401, 1230, 875, 717

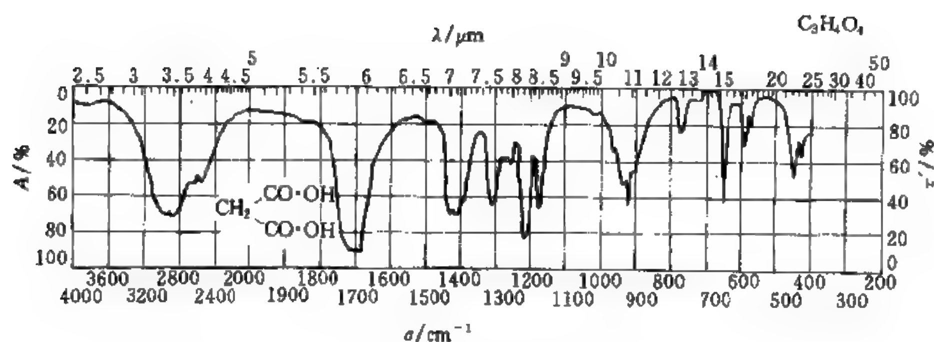


图 19-86　丙二酸

2990, 2920, 1724sh, ≈1700, 1435, 1414, 1397, 1313, 1218, 1174, 920, 651

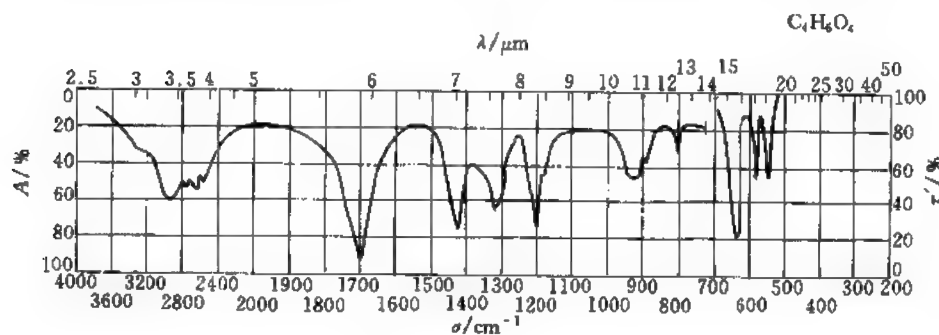


图 19-87　丁二酸

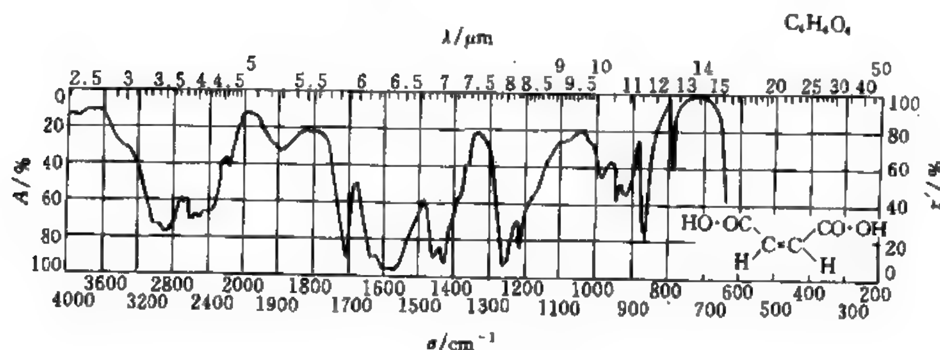


图 19-88　马来酸

1709, 1634, 1592, 1571, 1461, 1433, 1261, 1220, 864

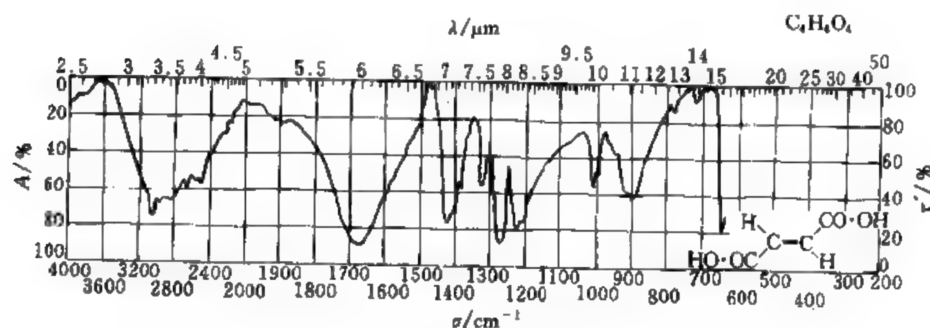


图 19-89　富马酸

3093, 2996, 2882, 1708sh, 1678, 1426, 1413sh, 1274, 1230, 1213, 900, 646

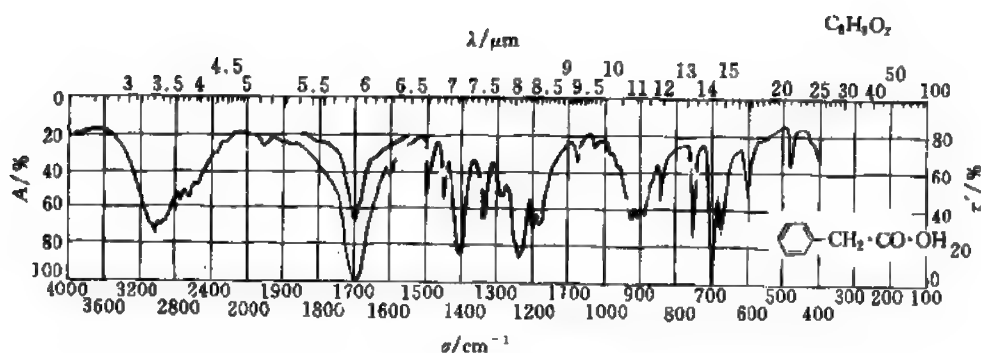


图 19-90　苯乙酸

3025，1698，1406，1240，1195，752，700，678

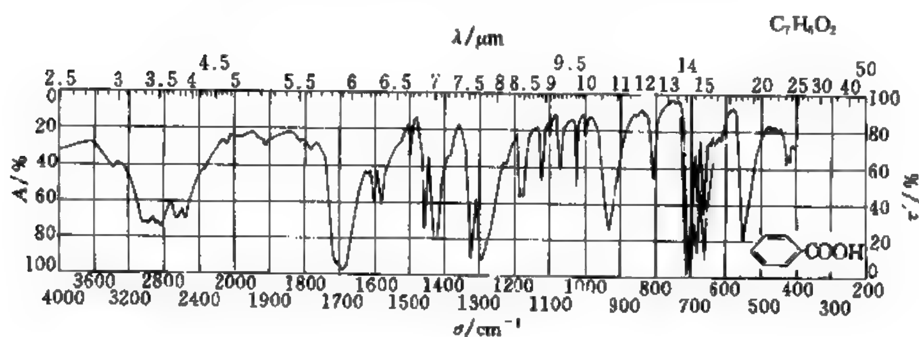


图 19-91　苯甲酸

2985，2825，1695，1456，1424，1328，1292，935，707

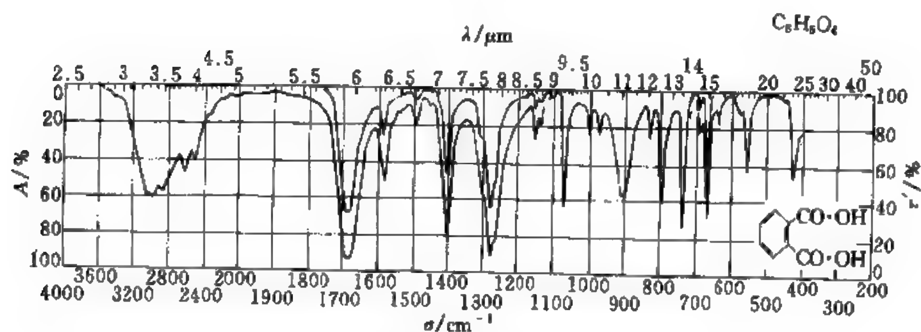


图 19-92　邻苯二甲酸

3049，2976，2865，1689，1675，1400，1282，1272sh，1071，905，803，797，740

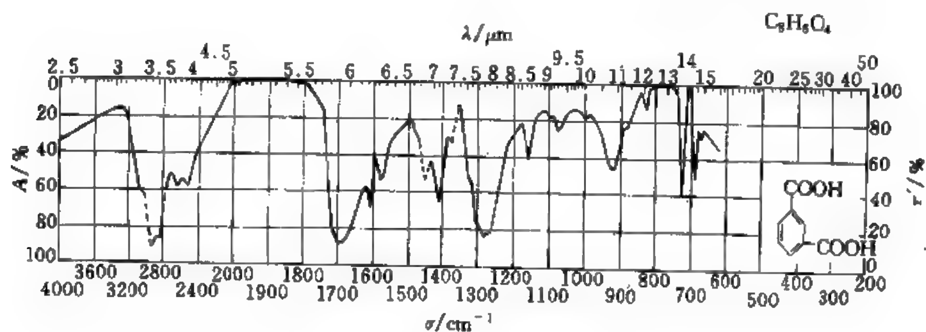


图 19-93　间苯二甲酸

2640，2530，1689，1613，1585，1414，1326sh，1279，928，729，689

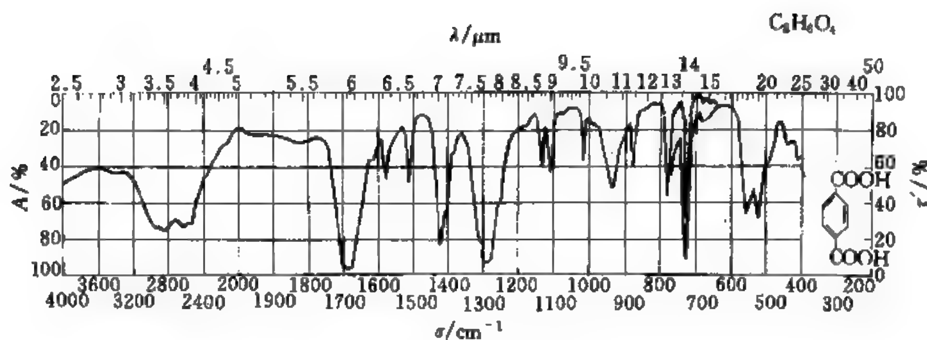


图 19-94　对苯二甲酸

2960sh, 2824, 2681, 2549, ≈1690,, 1426, 1405sh, 1316sh, 1289, 736, 560, 526

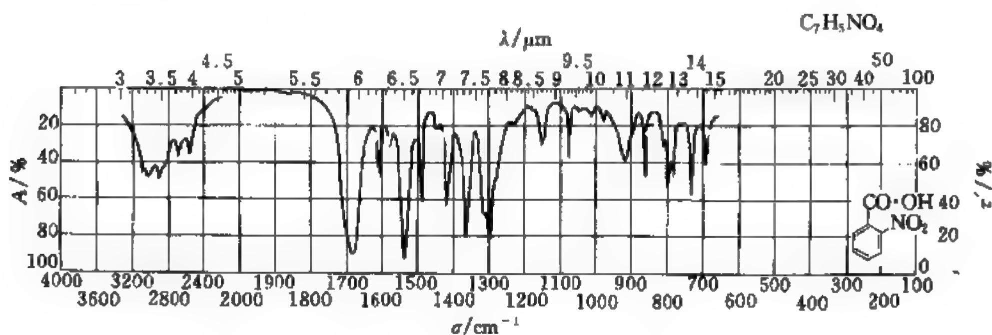


图 19-95　邻硝基苯甲酸

1683, 1536, 1491, 1419, 1367, 1313, 1295, 734

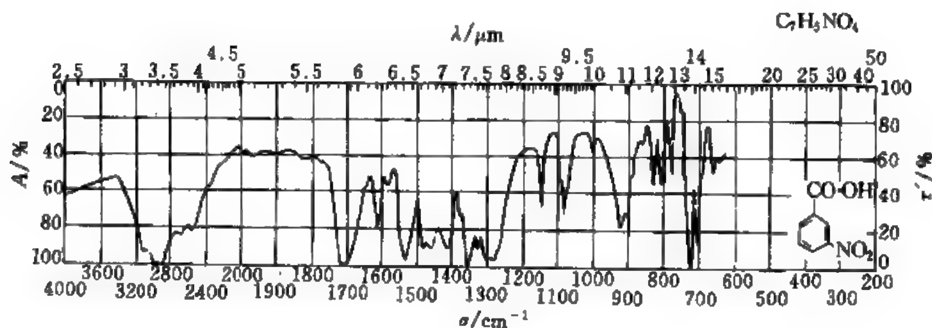


图 19-96　间硝基苯甲酸

3105, ≈1701, 1533, 1487, 1418, 1357, 1329, 1305, 1286, 1270sh, 722

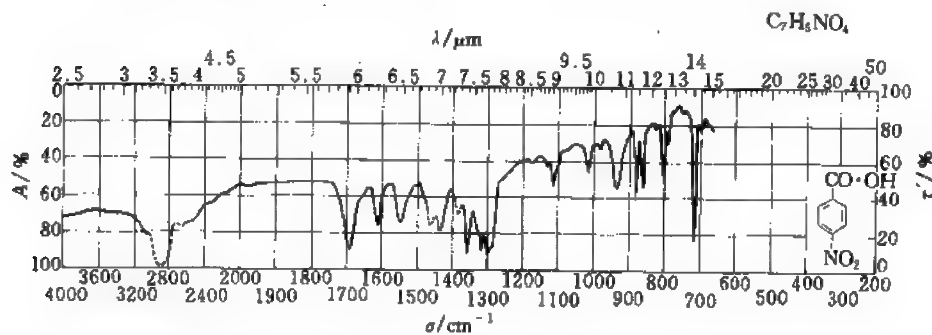


图 19-97　对硝基苯甲酸

1689, 1433, 1357, 1317, 1300, 1290sh, 717

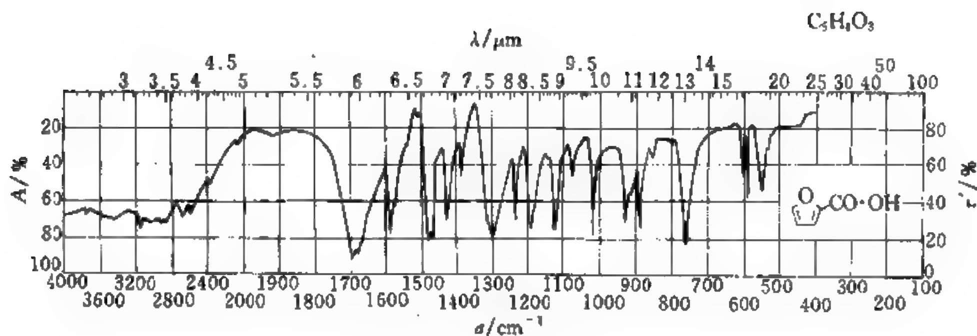


图 19-98 β-呋喃甲酸

1690, 1678, 1584, 1480, 1469, 1295, 1190, 1122, 1019, 887, 759

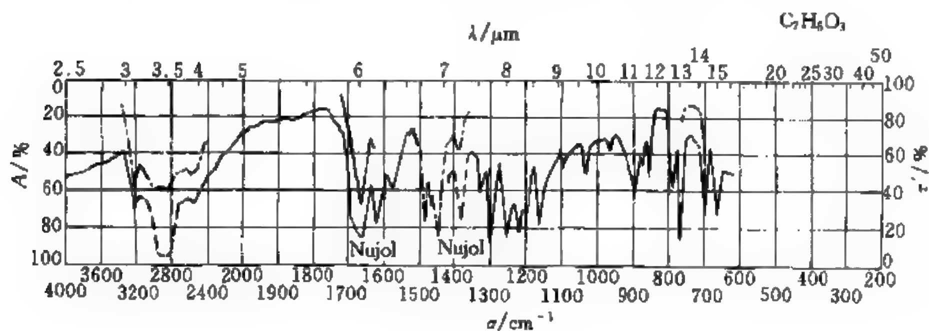


图 19-99 水杨酸

1662, 1484, 1466, 1446, 1296, 1250, 1213, 762

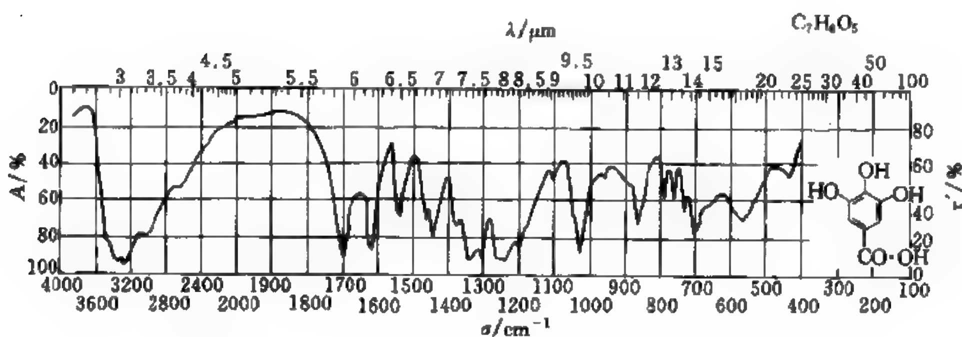


图 19-100 五倍子酸

3360, 3270, 1696, 1613, 1335, 1302, 1255sh, 1240, 1197, 1025

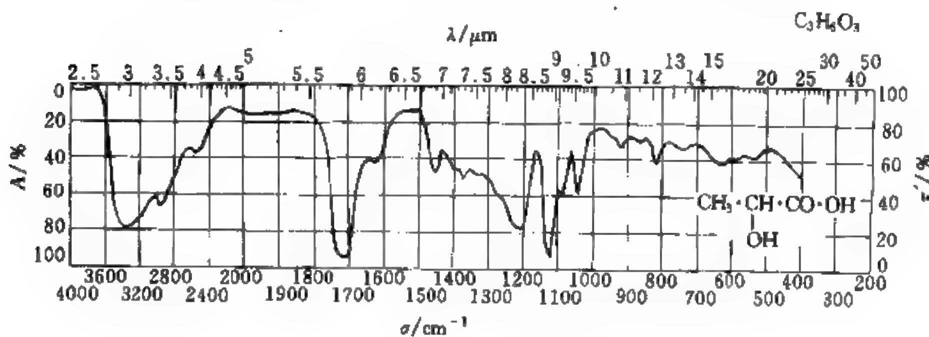


图 19-101 乳酸

3400, 2990, 2930sh, 1727, 1277sh, 1217, 1126, 1095, 1046

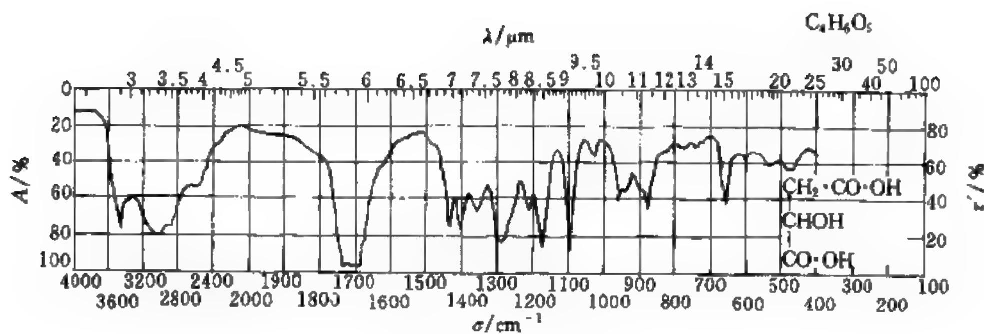


图 19-102　苹果酸

3445，3040，1735，1710，1690，1437，1405，1285，1180，1097

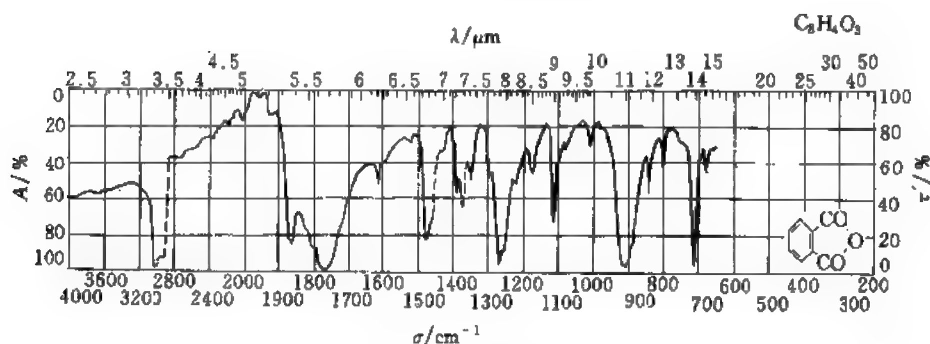


图 19-103　邻苯二甲酸酐

≈3010，1866，1802，1773，1481，1473sh，1267，1253sh，907，≈893sh，714

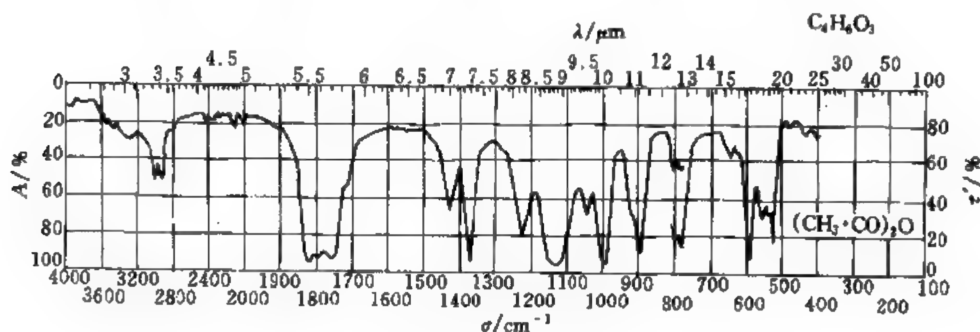


图 19-104　乙酸酐

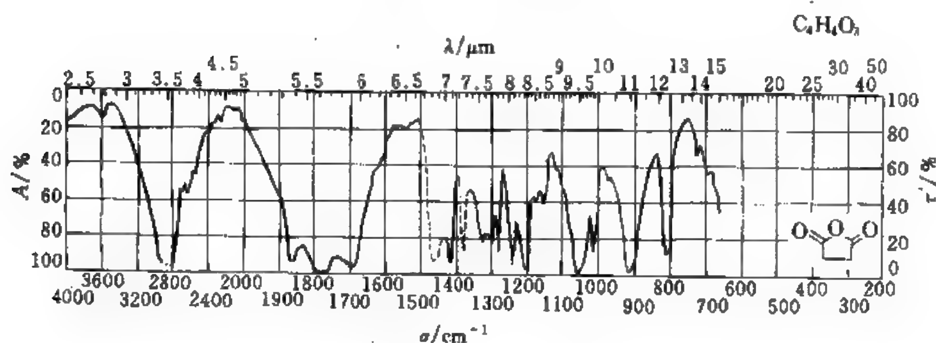


图 19-105　丁二酸酐

2965sh，2835，1871，1778，1701，1420，1241，1209，≈1055，917，907sh

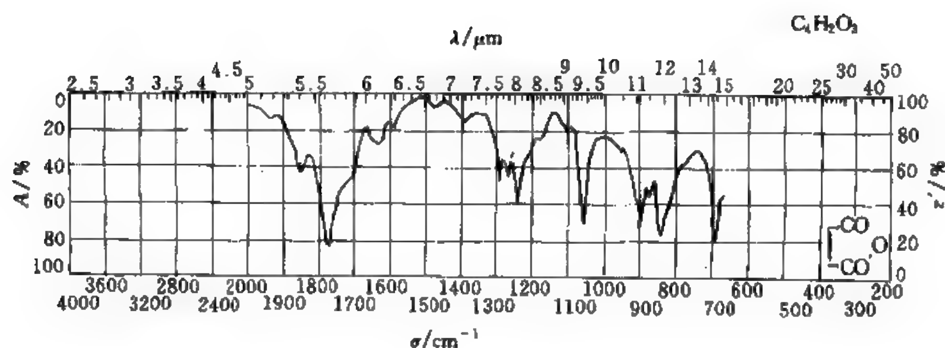


图 19-106　马来酸酐

1779，1762sh，1241，1067sh，1058，≈909sh，897，872，≈847sh，840，697

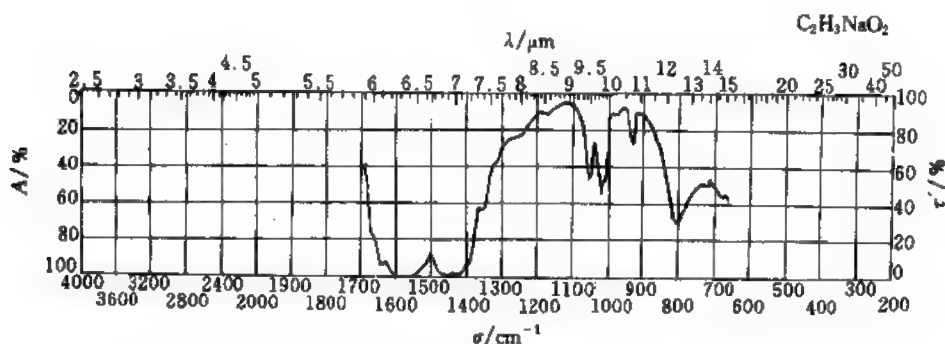


图 19-107　乙酸钠

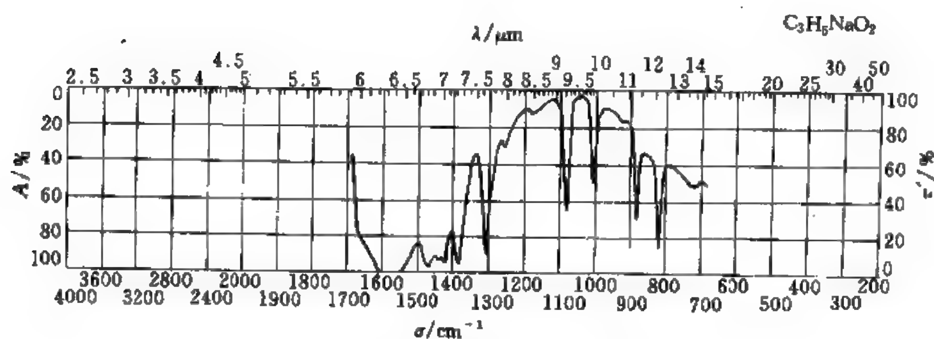


图 19-108　丙酸钠

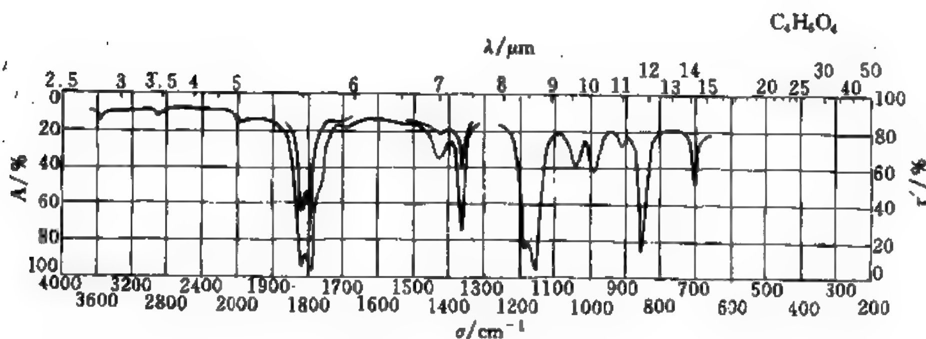


图 19-109　过氧化乙酰

1820，1797，1364，1186，1157，852，702

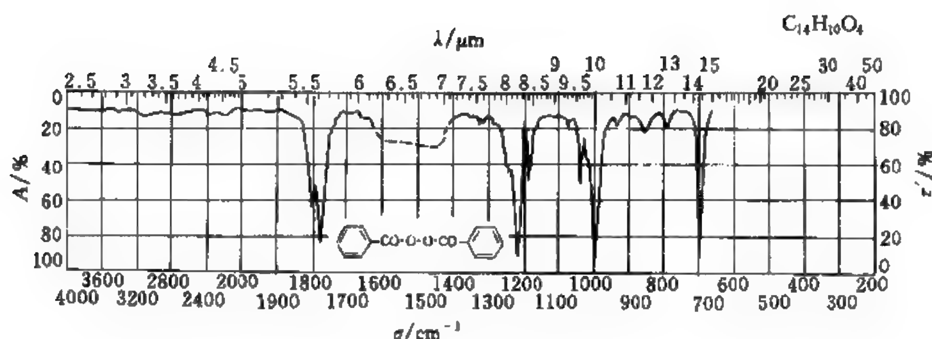


图 19-110　过氧化苯甲酰

1808，1783，1244，1220，1185，1040，997，699

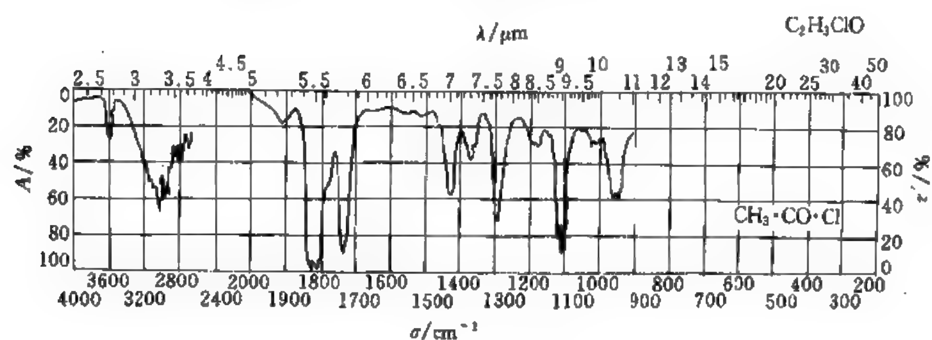


图 19-111　乙酰氯

3029，3015，1830，1811，1735，1295，1117，1109，1104，1099

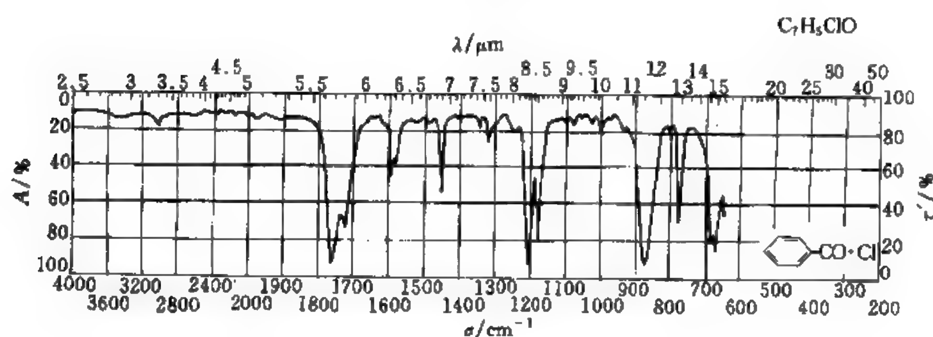


图 19-112　苯甲酰氯

1764，1721，1205，1175，871，773，≈680，645

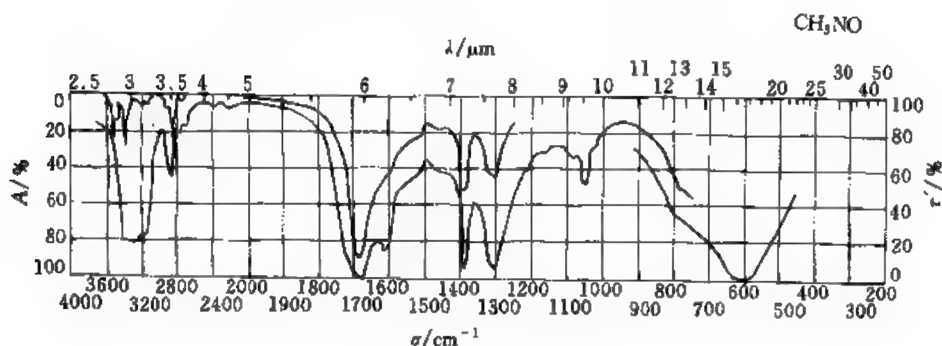


图 19-113　甲酰胺

3390，3320，3250sh，3185，1690，1610，1389，1308，595

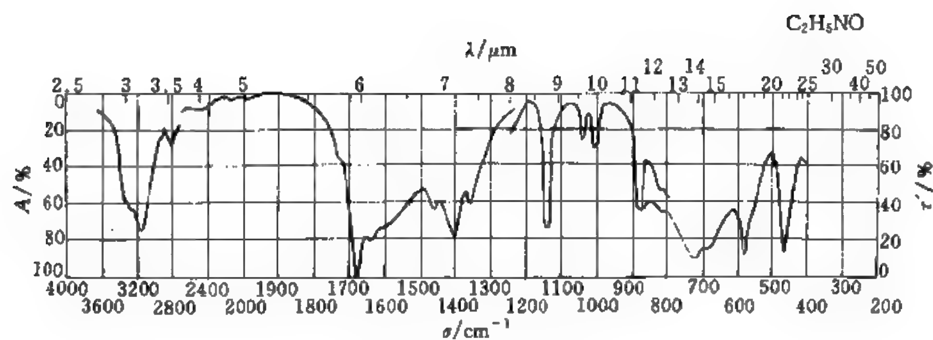


图 19-114　乙酰胺

3163，1680，1637，1600sh，1400，1137，685sh，581，466

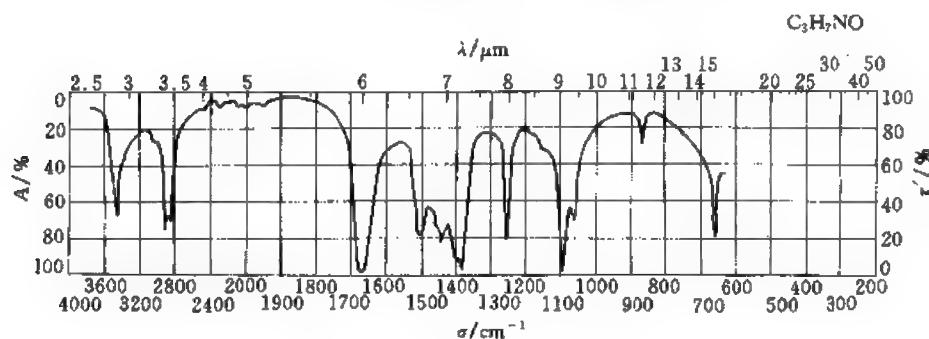


图 19-115　*N*，*N*-二甲基甲酰胺

2923，1670，1502，1439，1404sh，1386，1255，1094，660

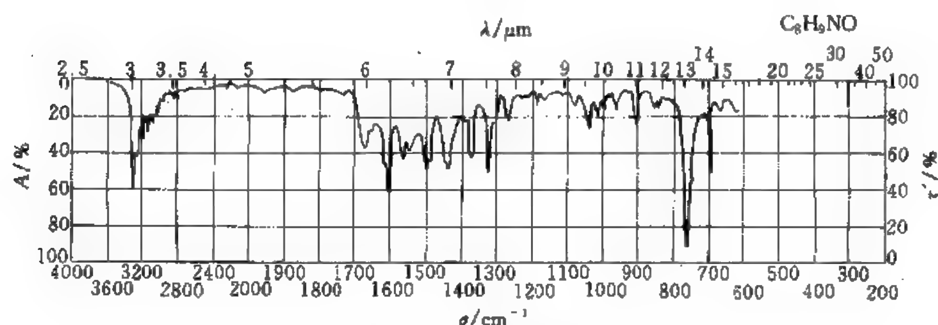


图 19-116　乙酰苯胺

3307，1611sh，1601，1500，1435，1323，760，750sh，697

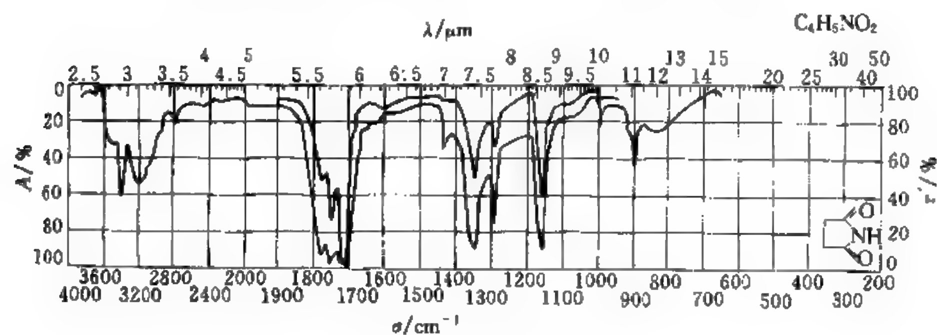


图 19-117　琥珀酰亚胺

3425，3200，1776，1753，1715，1350，1293，1160

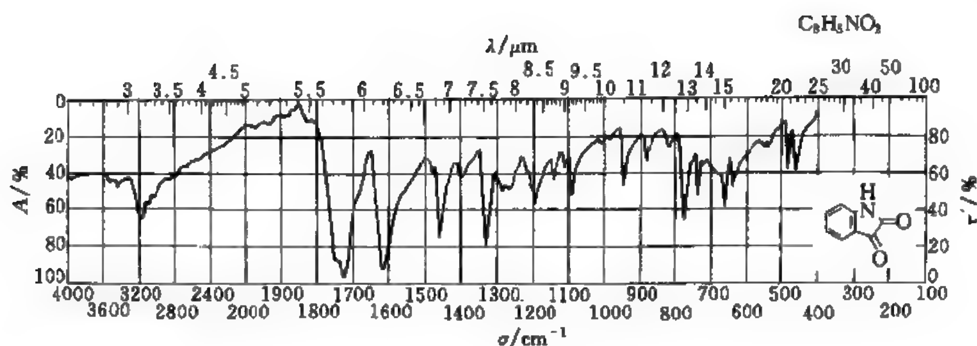


图 19-118　靛红

3180，1725，1615，1460，1330，1200，771，761

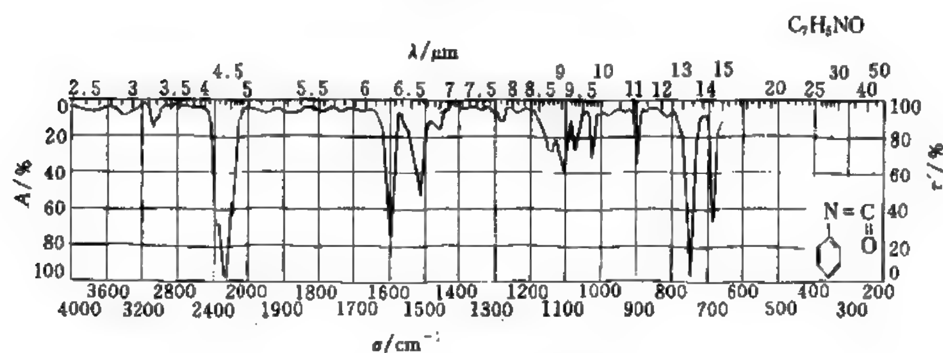


图 19-119　异氰酸苯酯

2370sh，≈2270，2200，1600，1515，1109，901，752，687

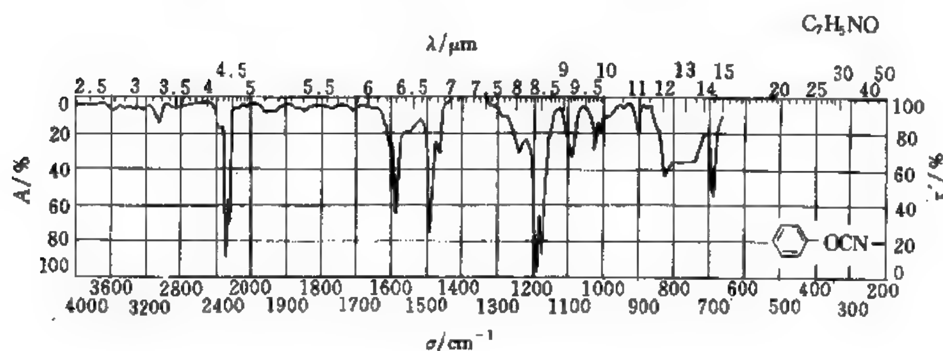


图 19-120　氰酸苯酯



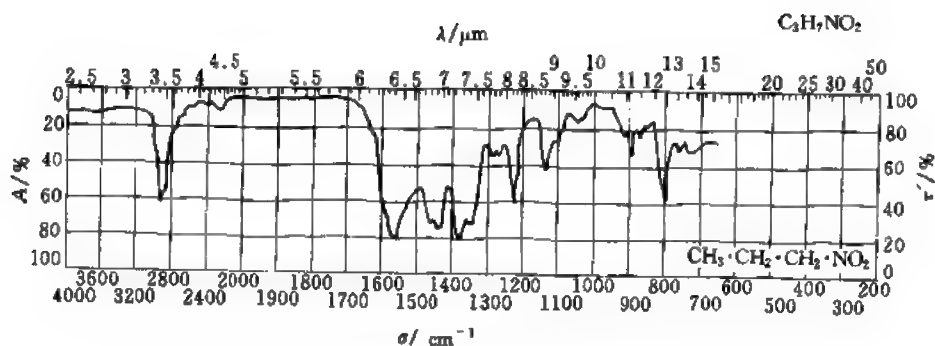


图 19-122 1-硝基丙烷

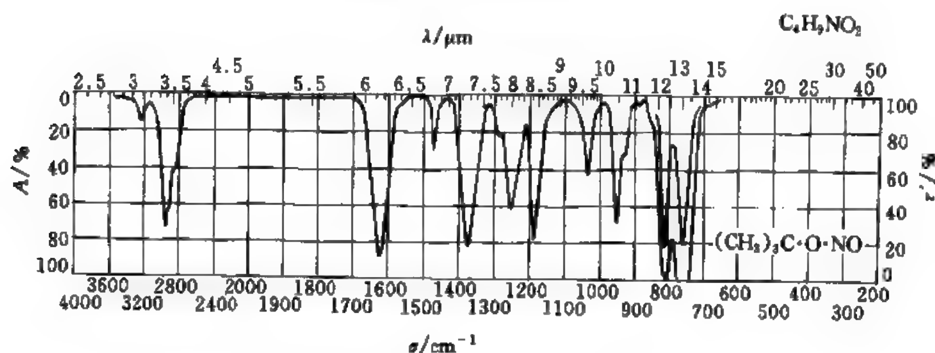


图 19-123 亚硝酸特丁酯

2960, 2930sh, 1626, 1372, 1251, 1188, 951, 811, 760

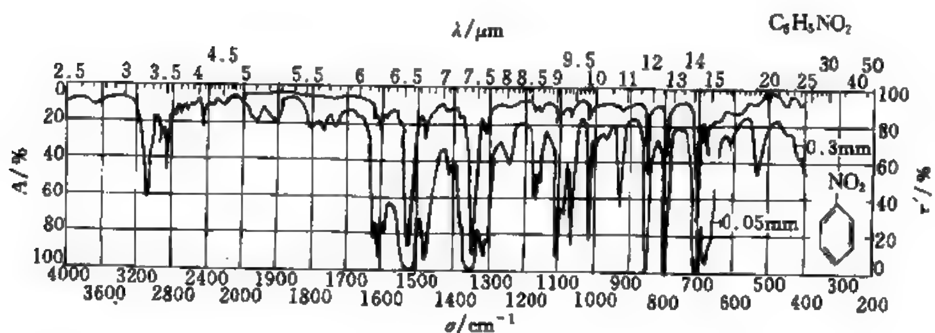


图 19-124 硝基苯

1610, 1527, 1481, 1351, 1319, 853, 793, 702, 680

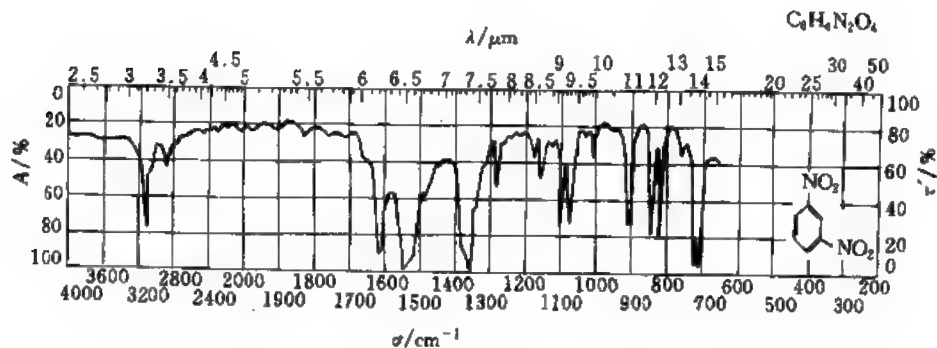


图 19-125 间二硝基苯

3135, 1613, 1541, 1520sh, 1379sh, 1357, 839, 819, 723, 710

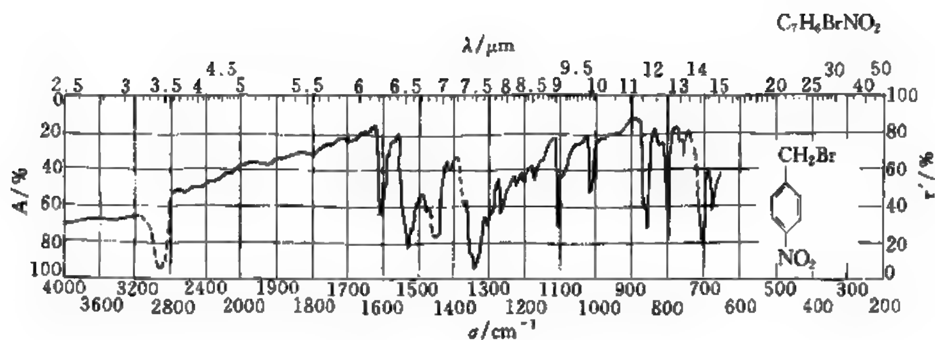


图 19-126　对硝基苄溴

1531，1520sh，1447sh，1350sh，1340，858，801，704，698sh

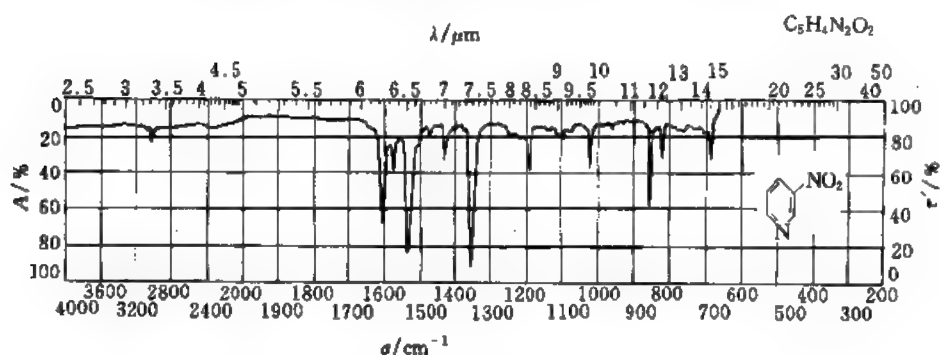


图 19-127　3-硝基吡啶

1600，1560，1535，1353，1192，1021，854

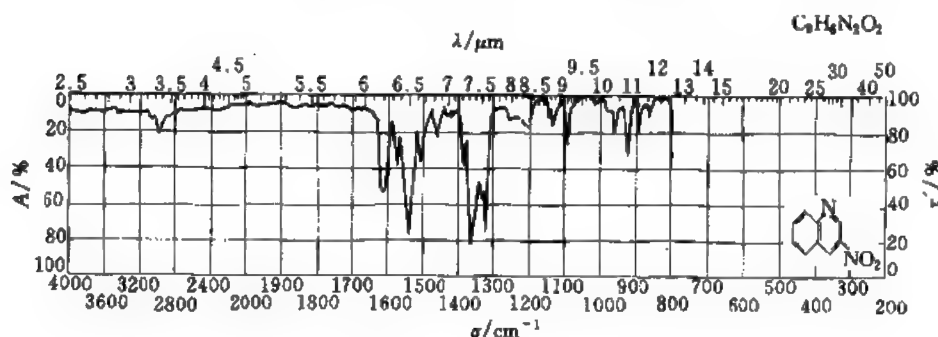


图 19-128　3-硝基喹啉

1620sh，1614，1576，1538，1604，1383，1363，1355sh，1335，1323，802

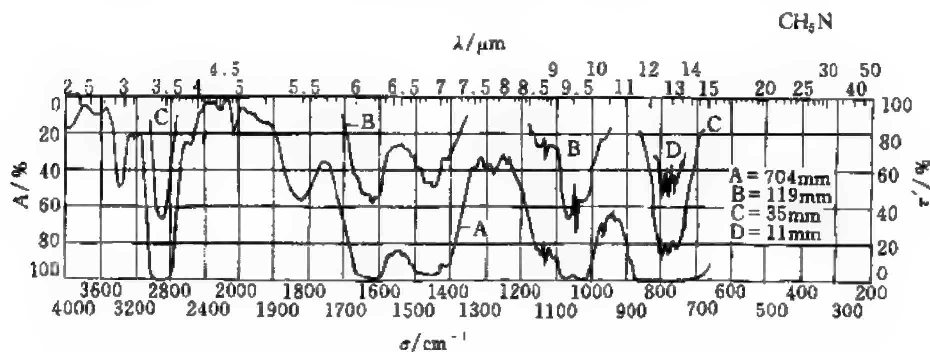


图 19-129　甲胺

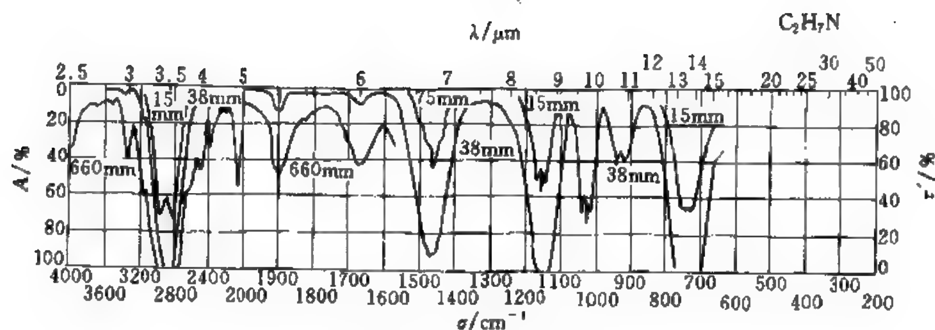


图 19-130 二甲胺

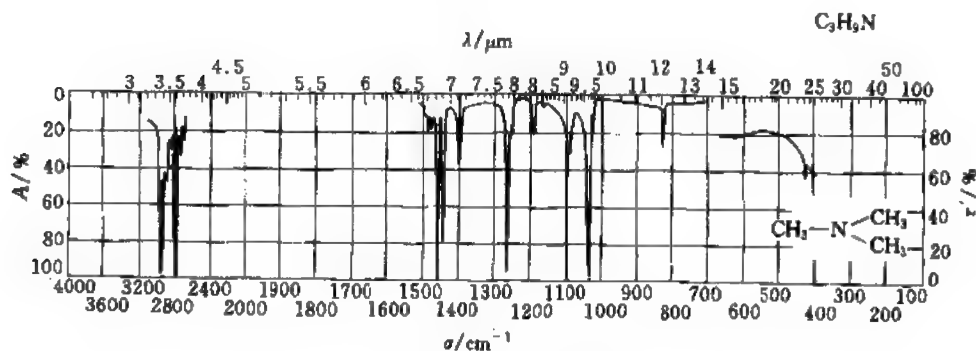


图 19-131 三甲胺

2970, 2944, 2818, 2768, 1461, 1446, 1269, 1096, 1036

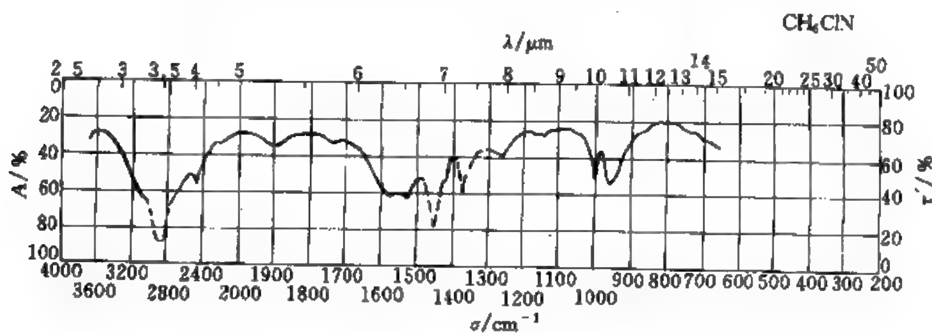


图 19-132 甲胺盐酸盐

2464, 1576, 1532, 1002, 958

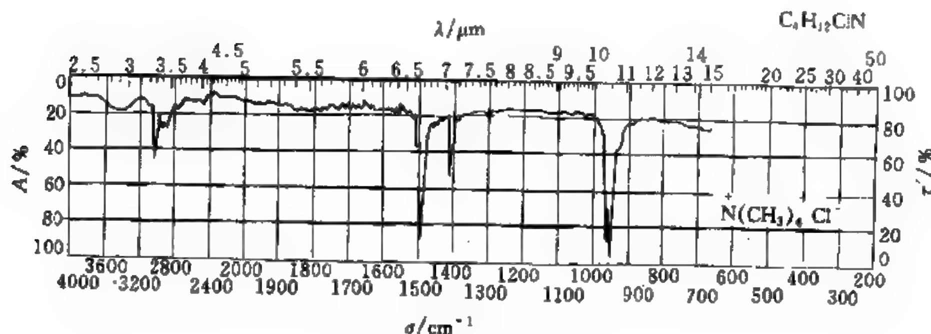


图 19-133 氯化四甲胺

3030, 1505, 1490, 1410, 1405, 960, 950

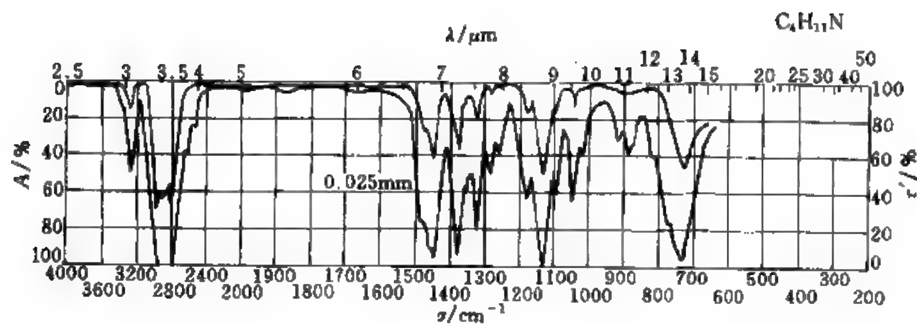


图 19-134 二乙胺

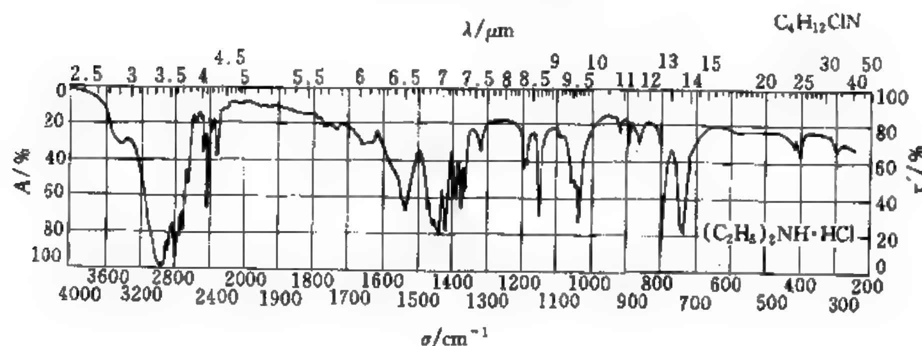


图 19-135 二乙胺盐酸盐

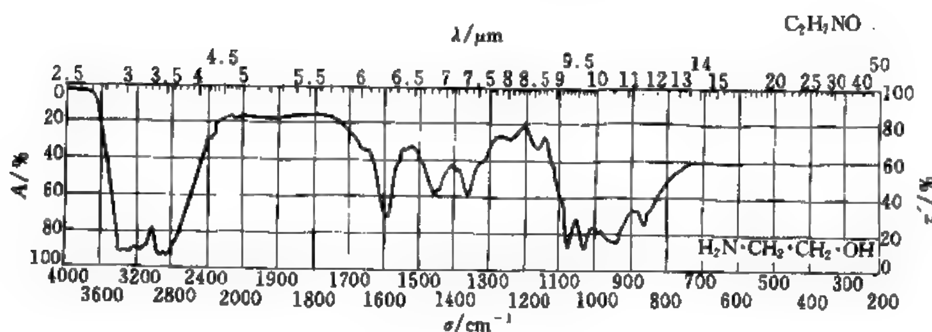


图 19-136 乙醇胺

3400, 3310, 3185, 3125sh, 2960, 2865, 1081, 1036, ≈959

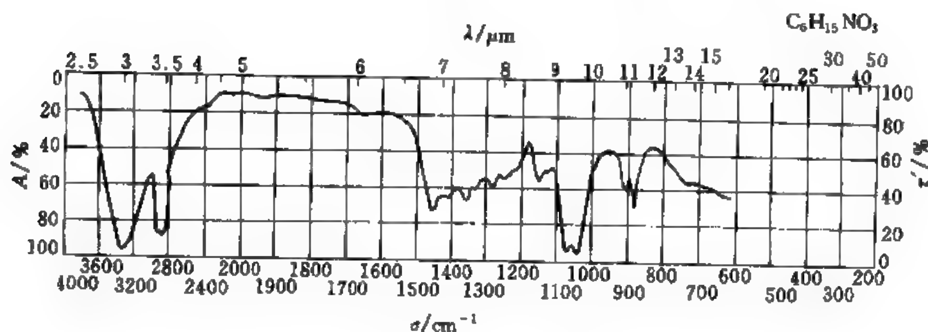


图 19-137 三乙醇胺

3320, 2876, 1452, 1359, 1074, 1038, 885

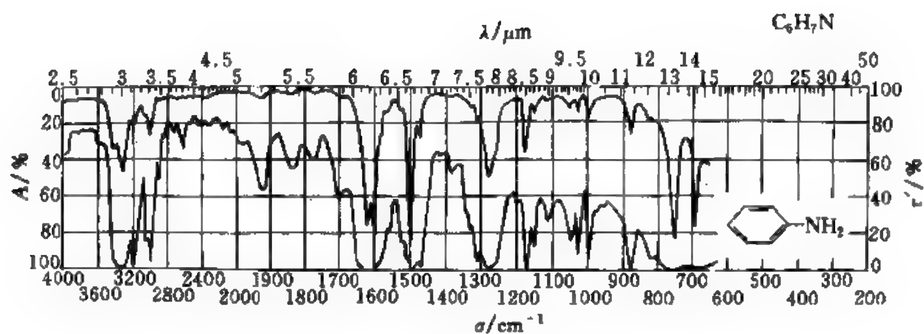


图 19-138 苯胺

3413，3333，1621，1603，1499，1277，1175，752，692

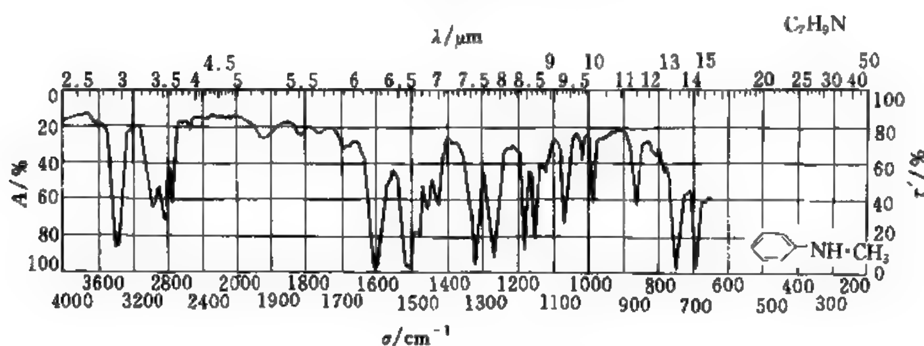


图 19-139 *N*-甲基苯胺

3400，1605，1513，1319，1266，1179，750，691

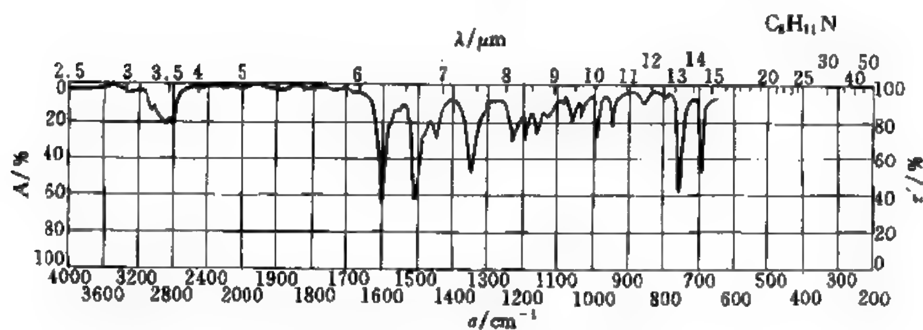


图 19-140 *N*，*N*-二甲基苯胺

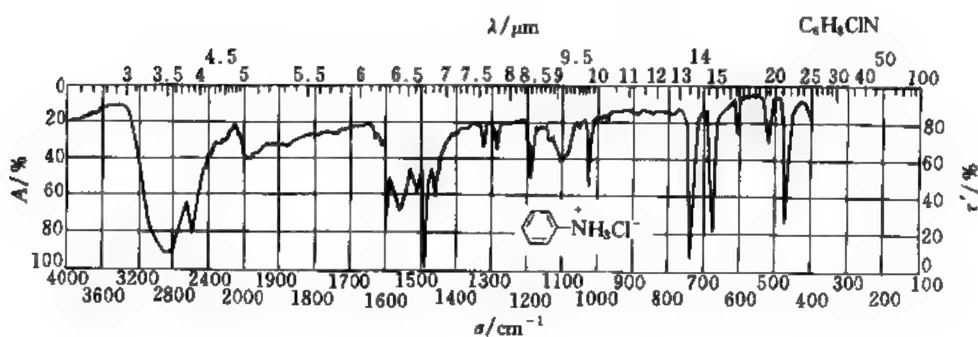


图 19-141 苯胺盐酸盐

2900，2585，2560，1595，1560，1512，1490，1457，737，675，467

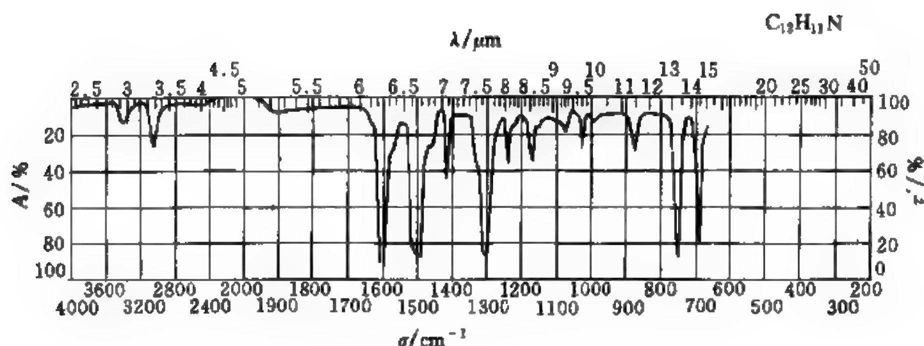


图 19-142　二苯胺

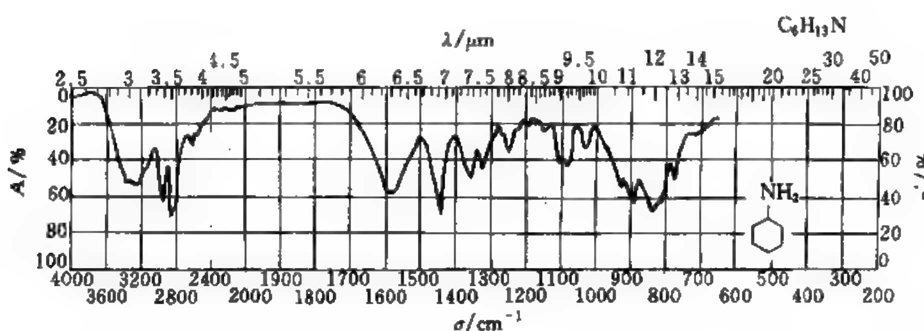


图 19-143　环已胺

2961，2870，2836，1590，1446，894，858sh，841，≈820sh

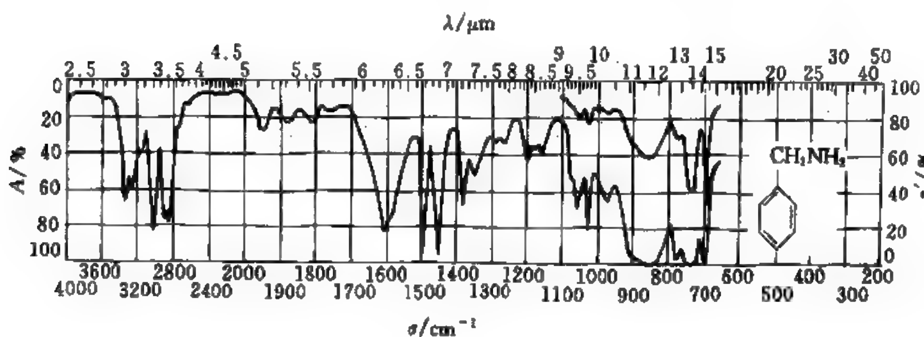


图 19-144　苄胺

1495，1453，909sh，872sh，858，848sh，778，745，735，697

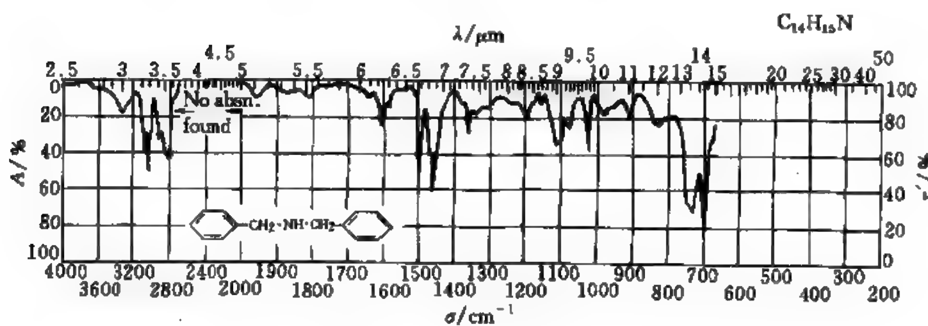


图 19-145　二苄胺

3061，3028，2817，1497，1456，1028，733，696

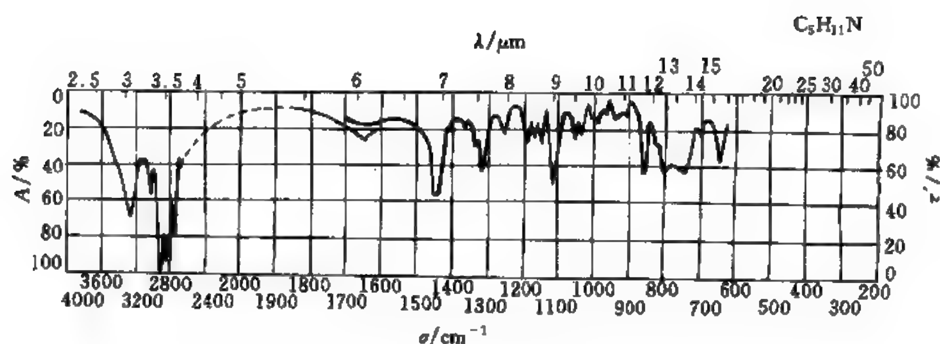


图 19-146 哌啶

3277, 3026, 2925, 2851, 2805, 2778, 1445, 1346, 1114, 860

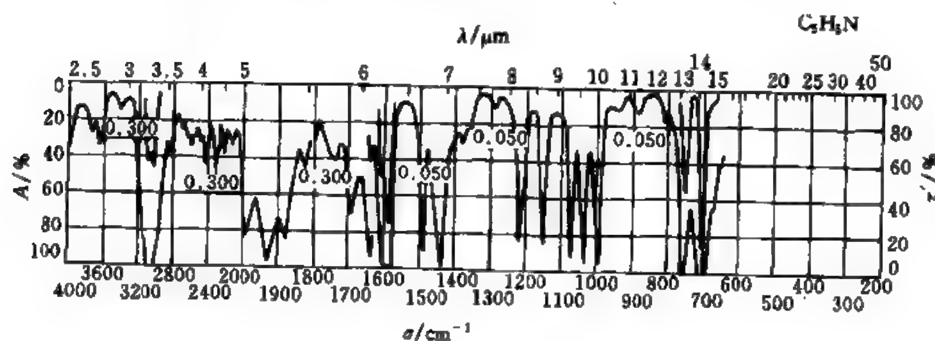


图 19-147 吡啶

3080, 3030, 1584, 1485, 1439, 1069, 1031, 991, 749, 702

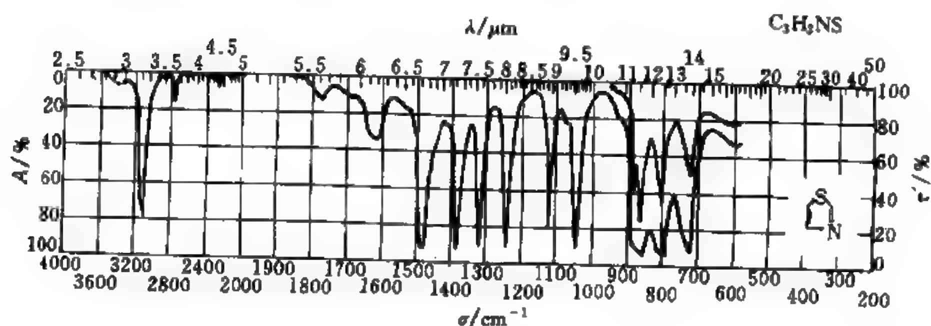


图 19-148 噻唑

3090, 1485, 1385, 1320, 1240, 1120, 1040, 880, 860, 800, 720

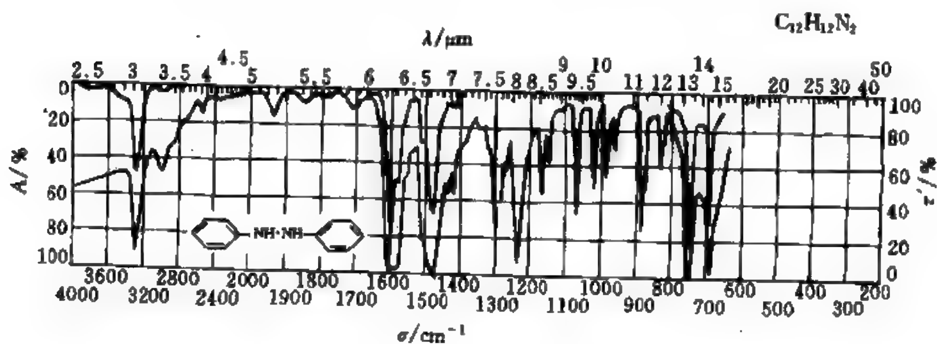


图 19-149 二苯胺

3290, 1597, 1582sh, 1511, 1484, 1244, 888, 751, 696

$C_{12}H_{12}N_2$

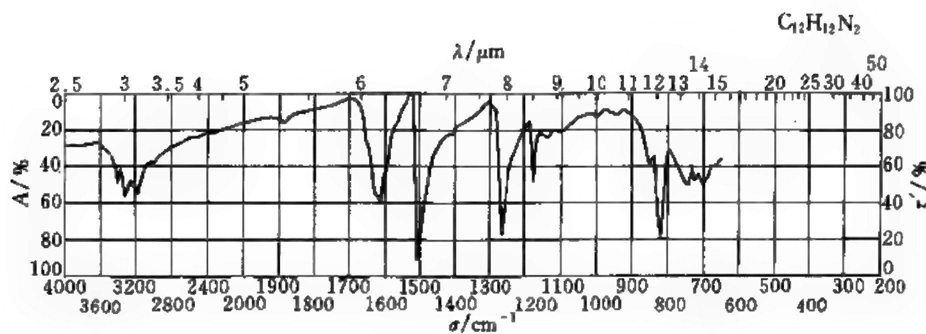


图 19-150 联苯胺

$C_{12}H_{10}N_2O$

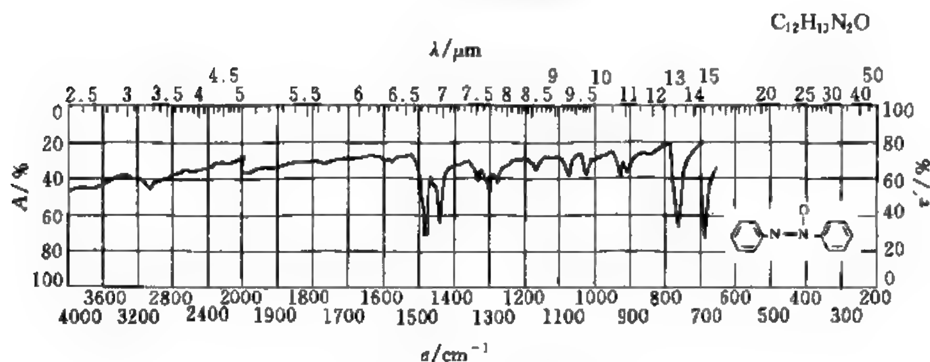


图 19-151 氧化偶氮苯

1486, 1477, 1456, 1442, 1332, 1302, 1279, 778sh, 764, 685

$C_{12}H_{10}N_2$

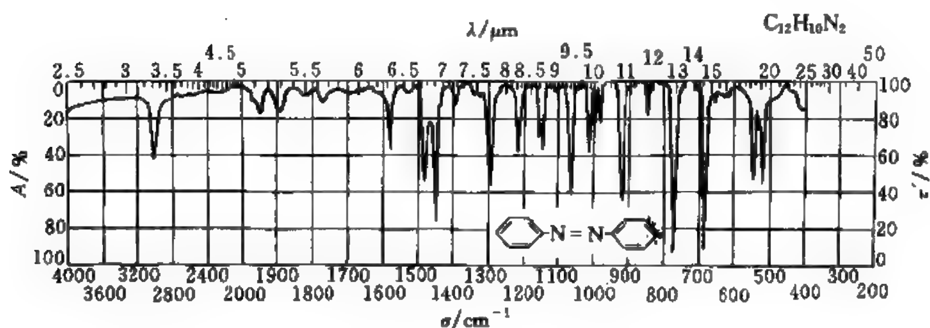


图 19-152 反式-偶氮苯

3049, 1484, 1451, 1300, 1071, 923, 776, 691, 549sh, 546, 521

$C_{12}H_{10}N_2$

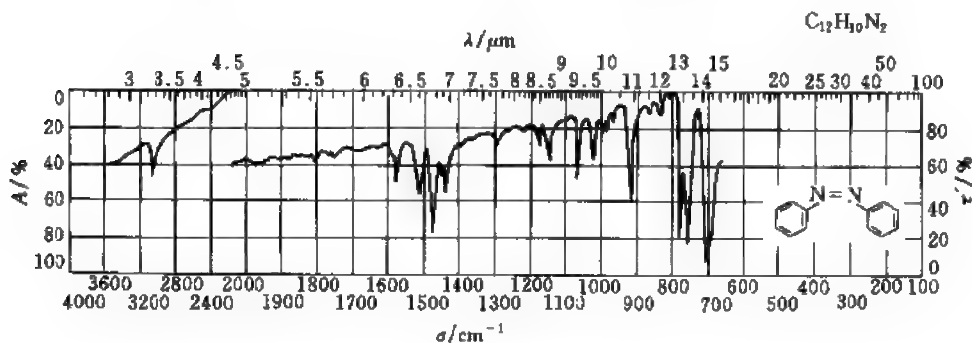


图 19-153 顺式-偶氮苯

3069, 1511, 1477, 1441, 921, 779, 759, 705, 695sh

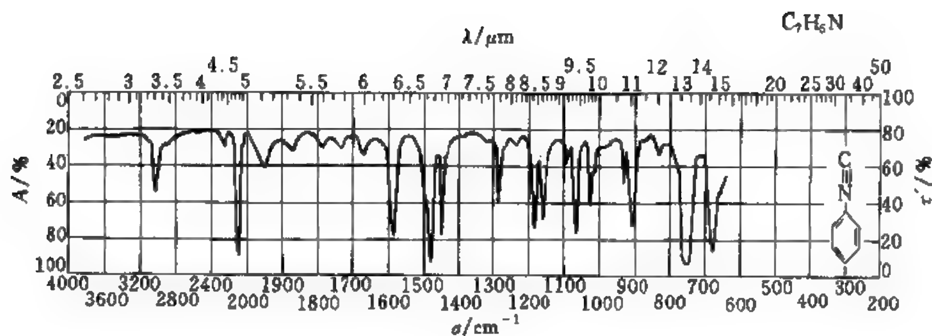


图 19-154 苯胩

2100, 1590sh, 1584, 1483, 1452, 1185, 1163, 1068, 1025, 911, 750, 679

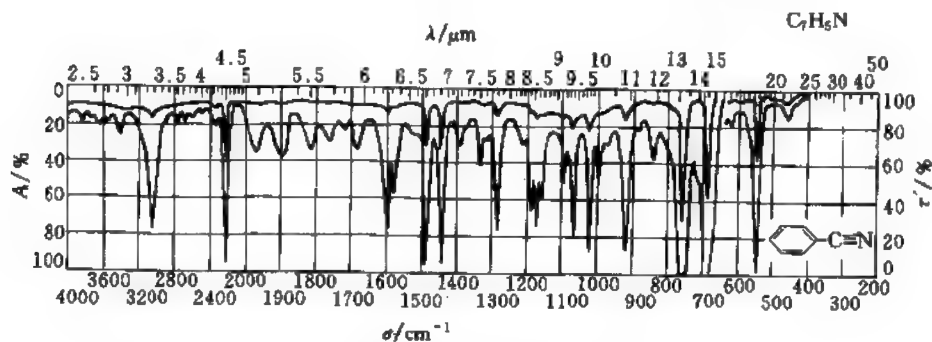


图 19-155 苯腈

2222, 1486, 1443, 1287, 1071, 1026, 924, 757, 686, 673sh, 548

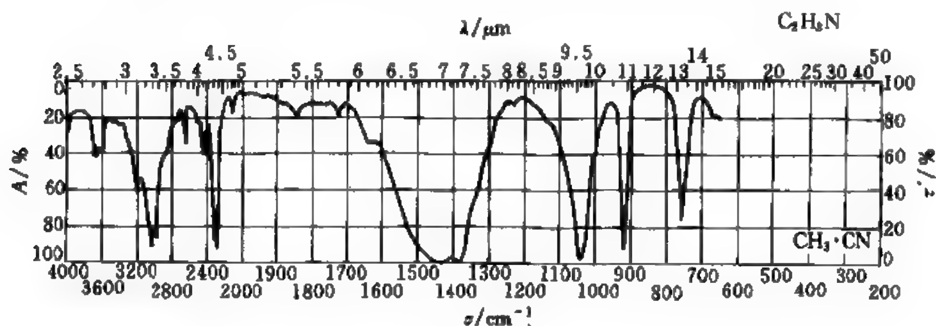


图 19-156 乙腈

3040, 2985, 2325, 2295, ≈1433, 1381, 1040, 922

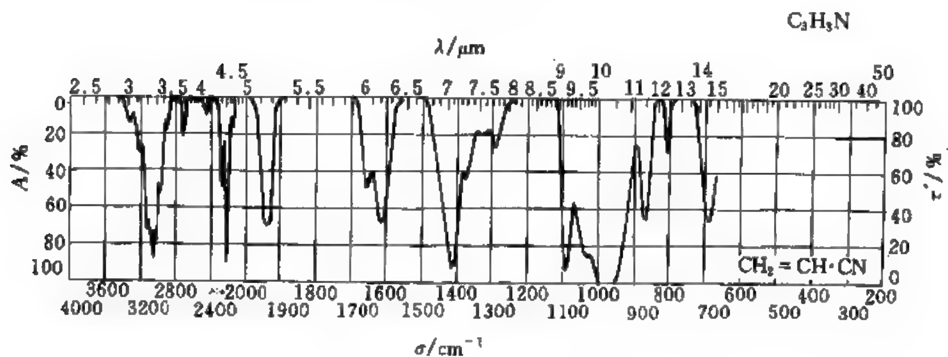


图 19-157 丙烯腈

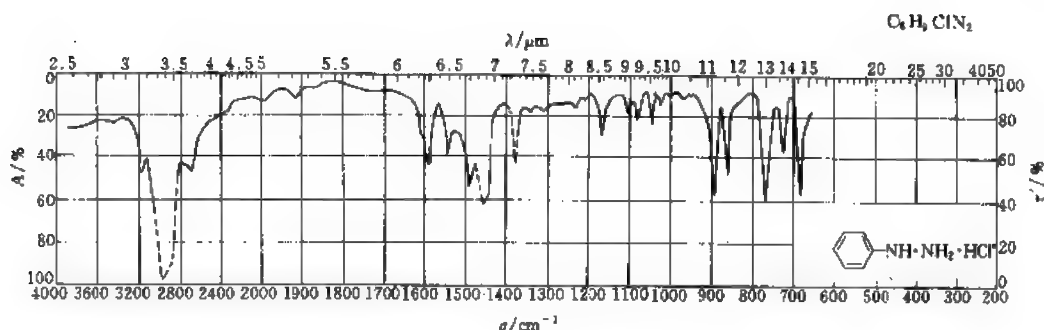


图 19-158 盐酸苯肼

3197, 2651, 1587, 1543, 1493, 1447sh, 890, 862, 768, 727, 681

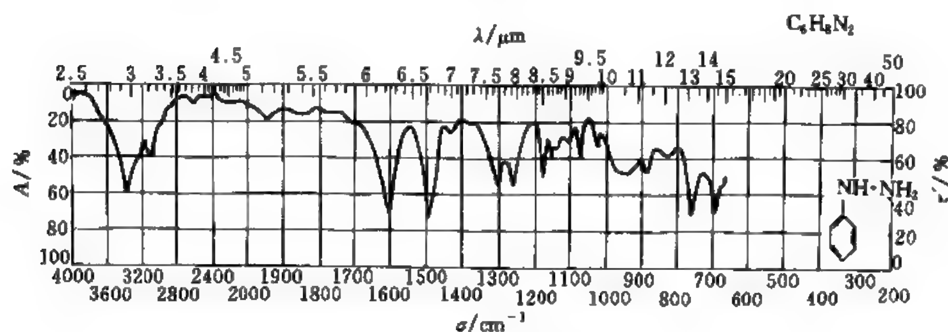


图 19-159 苯肼

3365, 1621sh, 1600, 1495, 1305, 1261, 1176, ≈759, 697

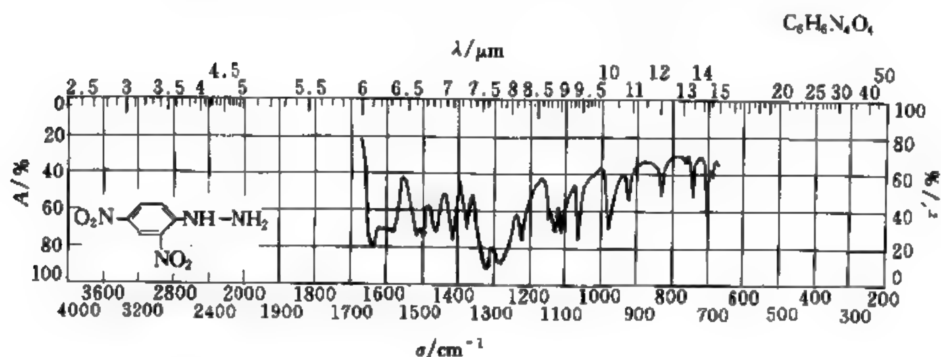


图 19-160 2，4-二硝基苯肼

1637, 1517, 1497, 1414, 1319, 1287, 1224, 1125, 1111, 1062

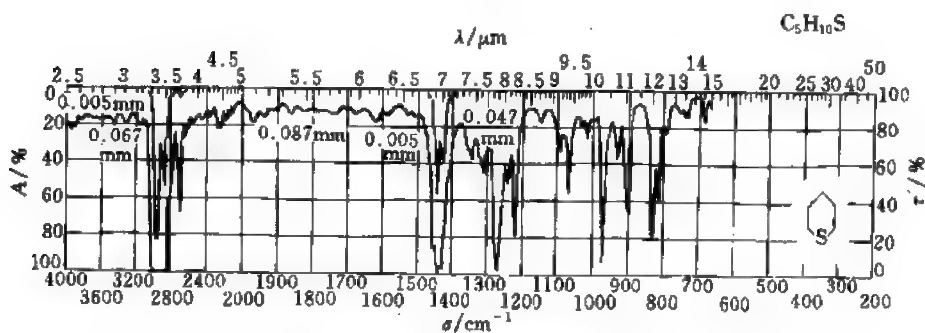


图 19-161 硫代环己烷

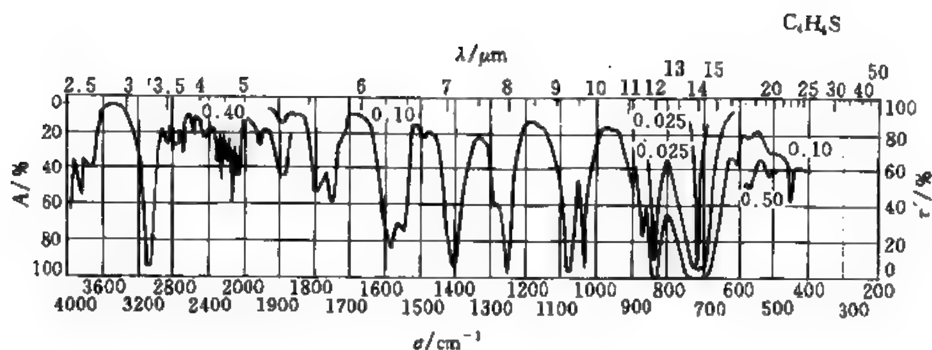


图 19-162 噻吩

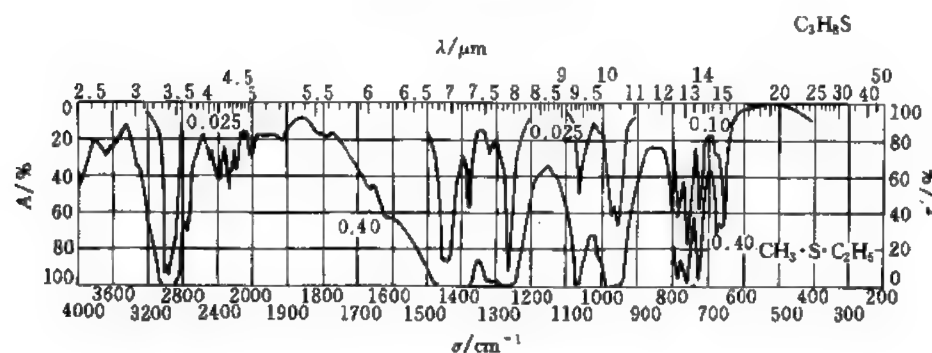


图 19-163 乙基甲基硫醚

2975，2934，1451，1437，1378，1323，1311，1268，1063，970，956，758

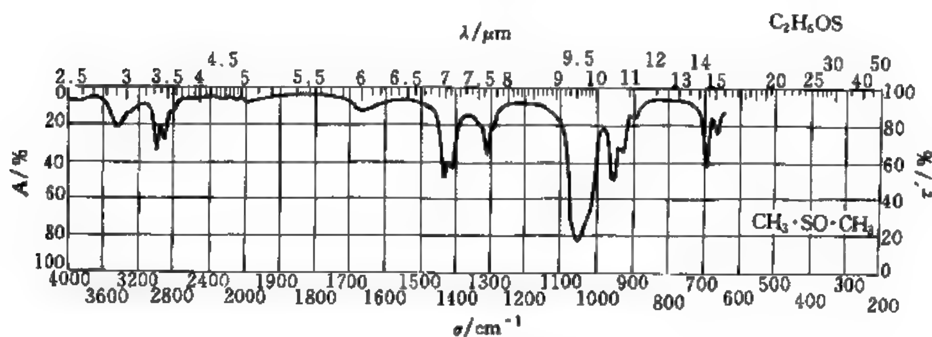


图 19-164 二甲基亚砜

2975，1437，1407，1309，1052，1020sh，954，930，697

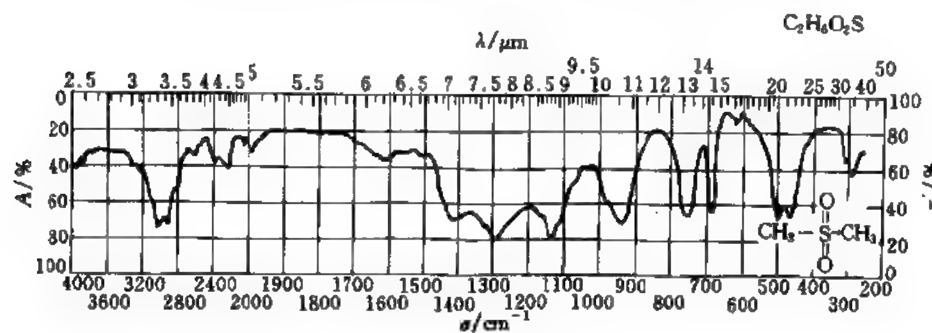


图 19-165 二甲基砜

3008，2922，1423，1407，1329sh，1291，1135，1114sh，940，756，499，463

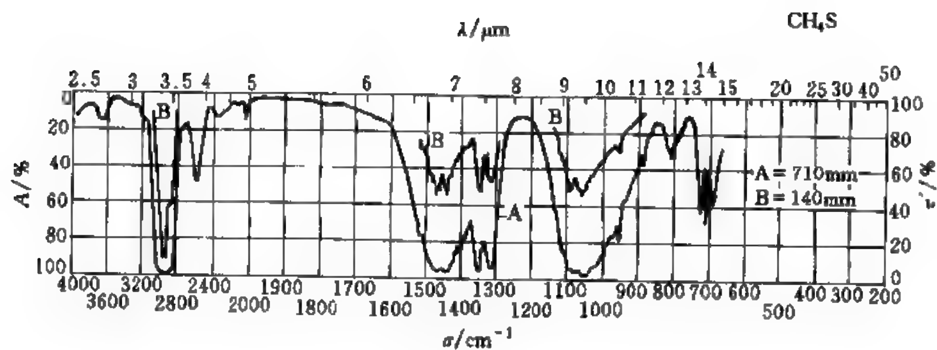


图 19-166 甲硫醇

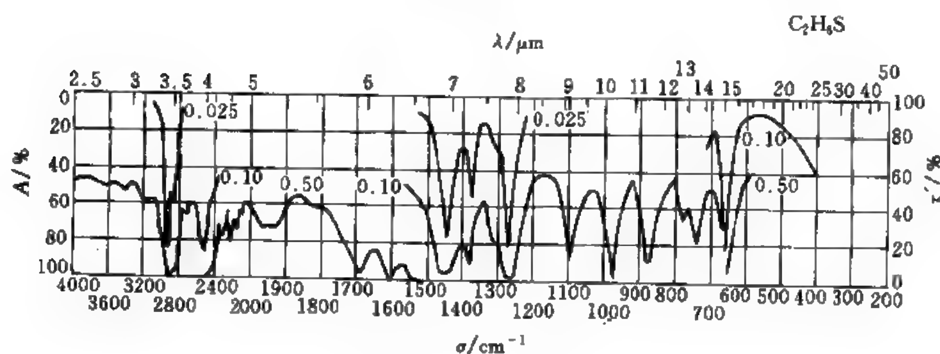


图 19-167 乙硫醇

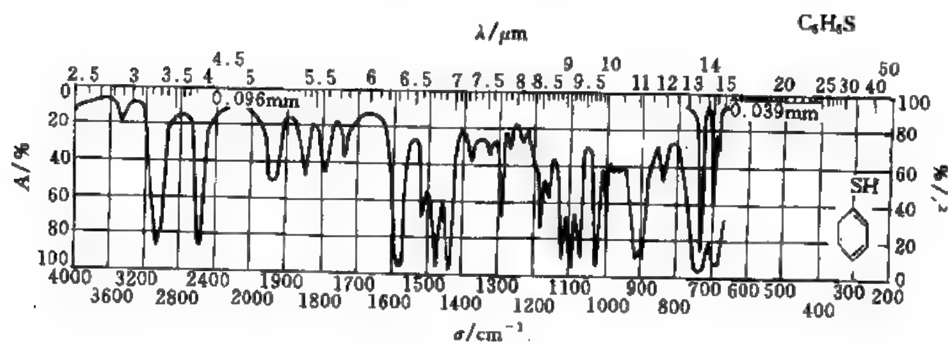


图 19-168 硫代苯酚

1582, 1479, 1439, 1120, 1094, 1026, 733, 699, 687

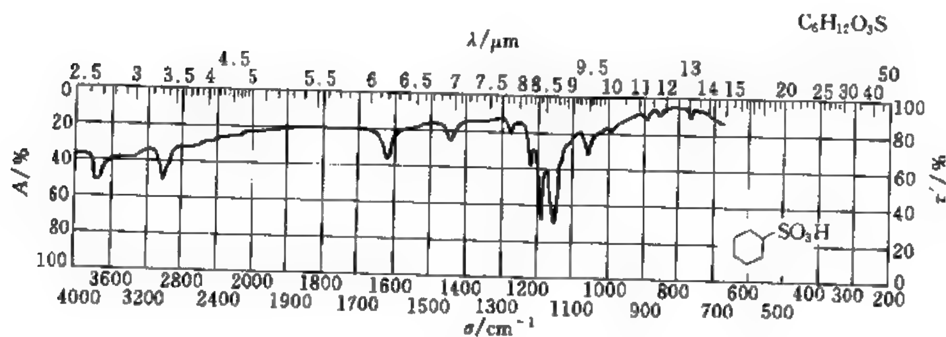


图 19-169 环己烷磺酸

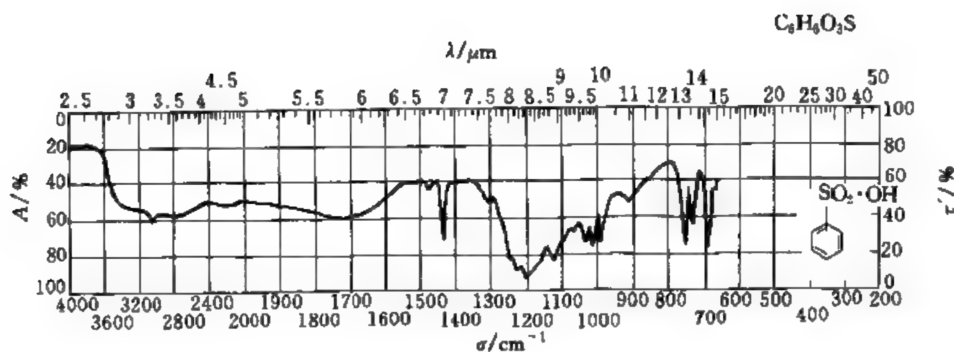


图 19-170　苯磺酸

1250，1229，1201，1188sh，1168sh，1127，1033，1016，994，752，690

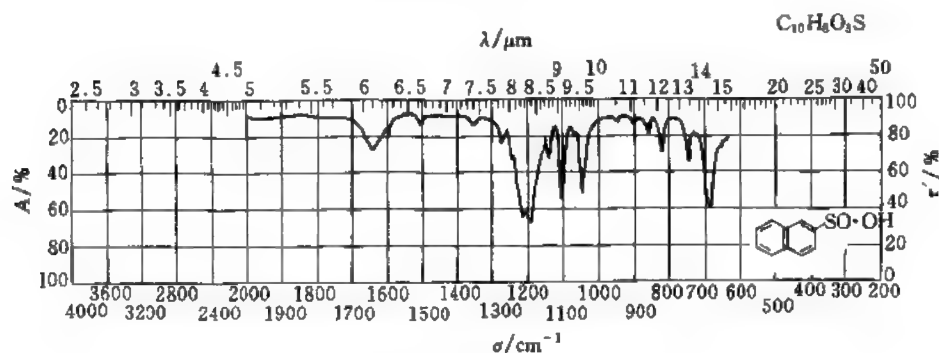


图 19-171　β-萘磺酸

1215，1192，1103，1043，692sh，685

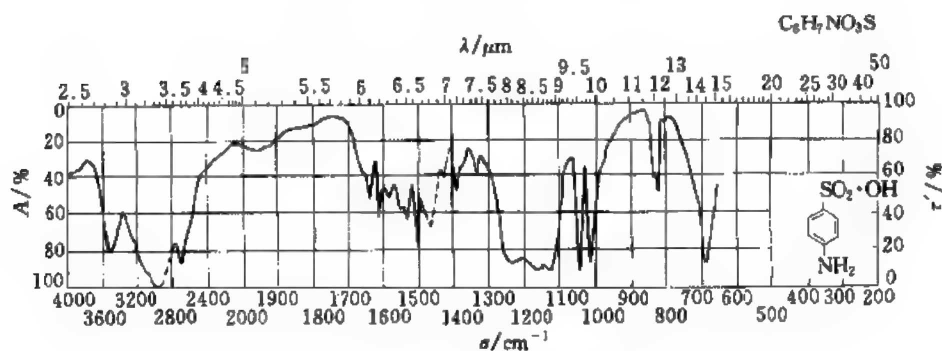


图 19-172　对氨基苯磺酸

3125sh　3010sh，2705，≈1242，1190sh，1175～1155，≈1125，1037，1013，≈687

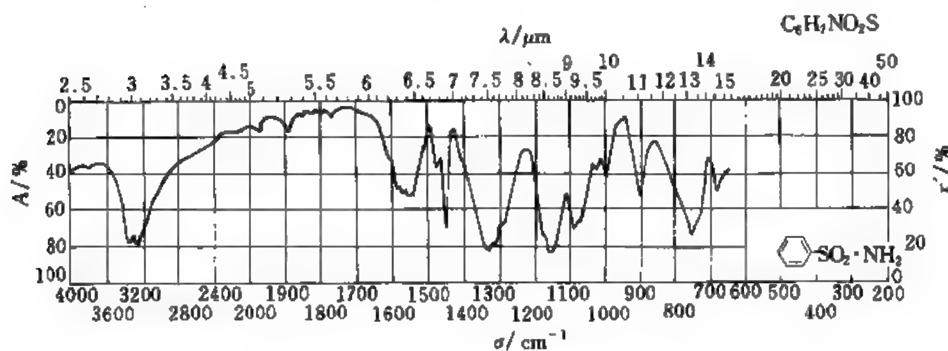


图 19-173　苯磺酰胺

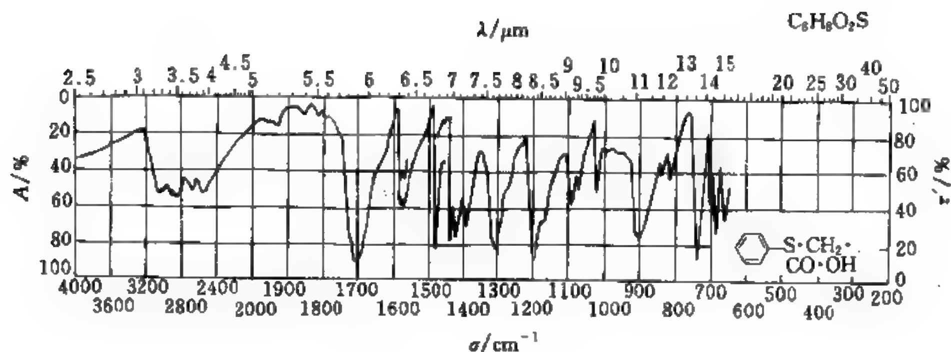


图 19-174 苯乙酸硫醚

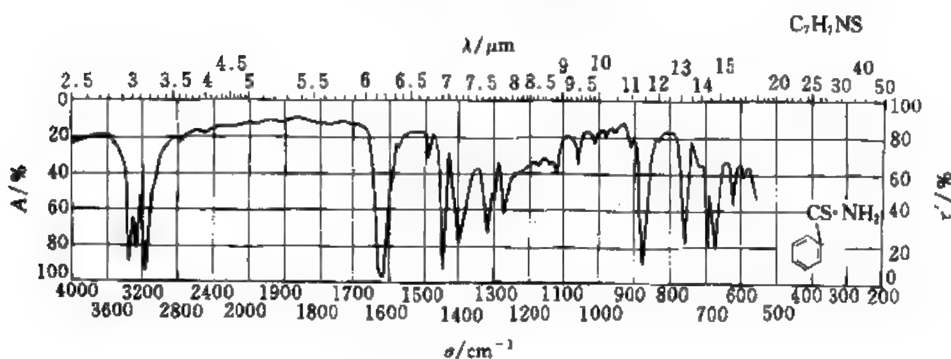


图 19-175 苯硫代酰胺

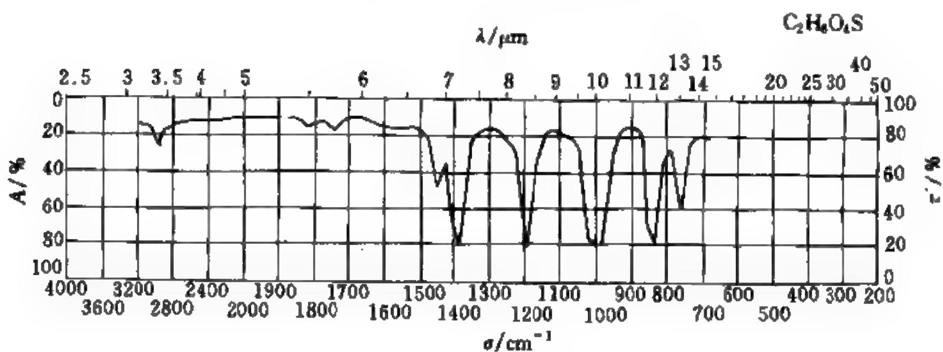


图 19-176 硫酸二甲酸

1452，1385，1196，1007sh，983，829，756

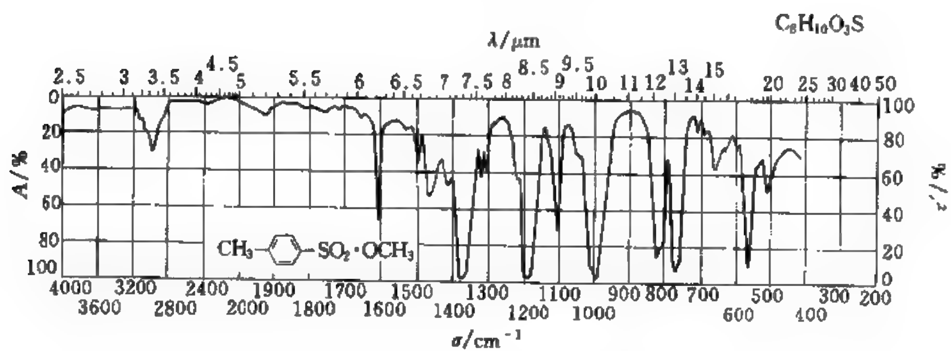


图 19-177 对甲基苯磺酸甲酯

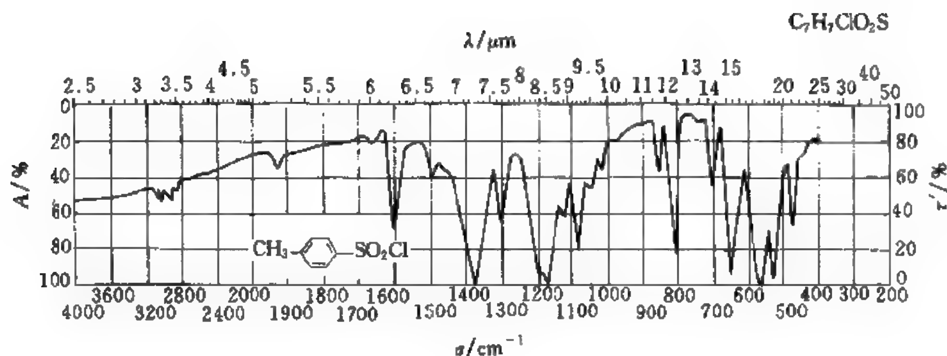


图 19-178 对甲基苯磺酰氯

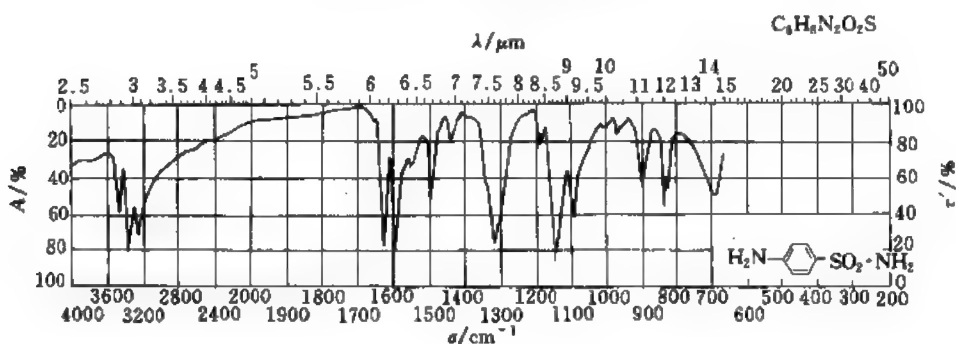


图 19-179 对氨基苯磺酰胺

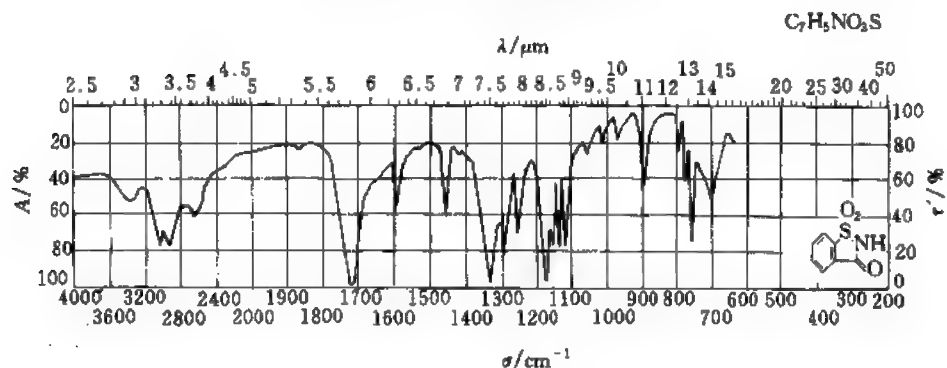


图 19-180 糖精

3053, 2950, 1721, 1335, 1321sh, 1297, 1256, 1176, 1161, 1139, 1121, 757

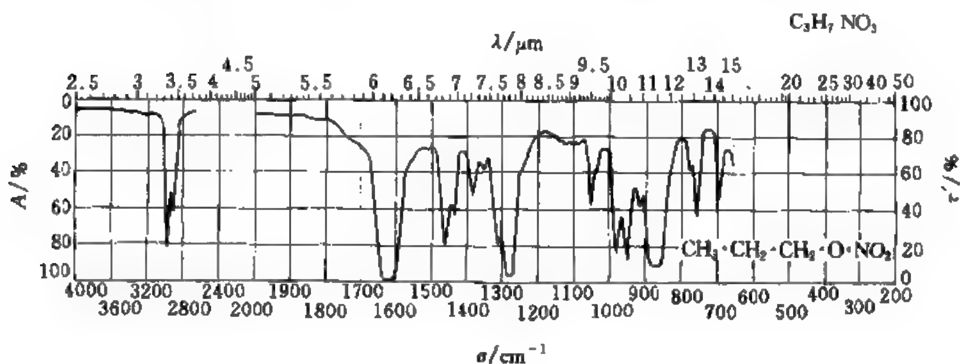


图 19-181 硝酸正丙酯

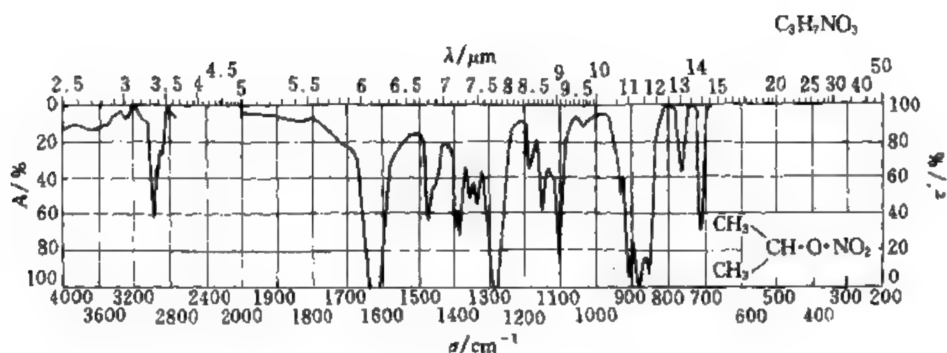


图 19-182 硝酸异丙酯

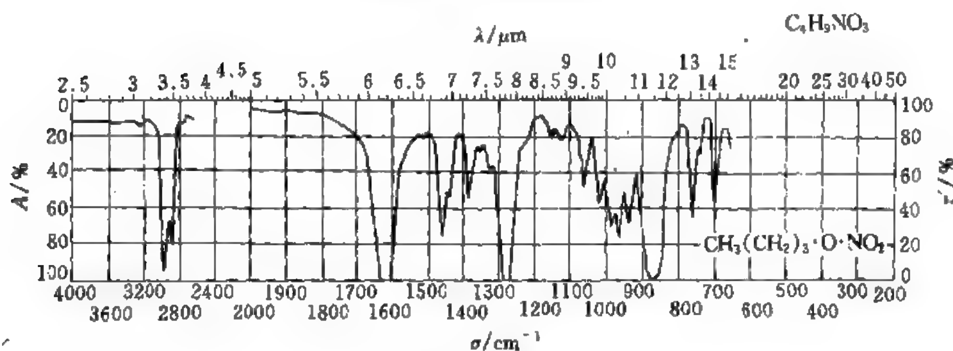


图 19-183 硝酸正丁酯

二、部分聚合物的红外光谱图[4,5]

本节提供了 180 个常见聚合物的红外光谱图，以供聚合物的定性鉴定之用，按聚合物分类共分为 13 类。其内容和谱图号见表 19-60。

表 19-60 部分聚合物红外光谱图索引

聚合物	谱图号	聚合物	谱图号
饱和线性脂肪族聚烯烃		2. 丁二烯共聚物类	
1. 聚乙烯类		丁二烯苯乙烯共聚物	19-199
聚乙烯	19-184	丁二烯丙烯腈共聚物	19-200
高压聚乙烯	19-185	甲基丙烯酸甲酯丁二烯共聚物	19-201
乙烯醋酸乙烯酯共聚物	19-186	顺式 1,4-聚异戊二烯	19-202
乙烯丙烯酸乙酯共聚物	19-187	**芳香族碳氢聚合物**	
乙烯丙烯酸丙烯酸盐共聚物	19-188	1. 聚苯乙烯类	
2. 聚丙烯类		聚苯乙烯	19-203
无规聚丙烯	19-189	苯乙烯乙酸乙烯酯共聚物	19-204
等规聚丙烯	19-190	苯乙烯丙烯酸酯共聚物	19-205
丙烯乙烯共聚物	19-191	苯乙烯丙烯腈(70+30)共聚物	19-206
3. 聚丁烯类		苯乙烯丙烯腈丁二烯共聚物	19-207
聚异丁烯	19-192	2. 聚对二甲苯	
低分子量聚异丁烯	19-193	聚对二甲苯	19-208
4. 脂环族聚烯烃		**聚氯代烯烃**	
萜烯树脂	19-194	1. 聚氯乙烯类	
环化橡胶	19-195	聚氯乙烯	19-209
不饱和脂肪族聚烯烃		氯化聚氯乙烯	19-210
1. 聚丁二烯		氯乙烯乙酸乙烯酯共聚物	19-211
1,2-聚丁二烯	19-196	氯乙烯乙酸乙烯酯马来酸半酯共聚物	19-212
1,4-反式聚丁二烯	19-197	氯乙烯乙酸乙烯酯马来酸酐共聚物	19-213
聚丁二烯(67%1,4-反式,20%1,4-顺式,和 12%1,2-结构)	19-198	氯乙烯和酯类单体的共聚物	19-214
		氯乙烯和乙烯异丁基醚共聚物	19-215

续表

聚合物	谱图号
氯乙烯和酯类化合物共聚物	19-216
氯化聚氯乙烯	19-217
2. 聚偏二氯乙烯类	
聚偏二氯乙烯	19-218
偏二氯乙烯氯乙烯共聚物	19-219
偏二氯乙烯丙烯腈醋酸乙烯酯共聚物	19-220
3. 聚氯丁二烯	
聚 2-氯丁二烯	19-221
4. 脂肪族聚烯烃的氯化,氯化氢产物	
氯化高压聚乙烯(31%Cl)	19-222
高氯化聚乙烯	19-223
氯化橡胶	19-224
聚氟代烯烃	
1. 氟代烯烃均聚物	
聚氟乙烯	19-225
聚偏二氟乙烯	19-226
聚四氟乙烯	19-227
聚三氟氯乙烯	19-228
2. 氟代烯烃共聚物	
偏二氟乙烯共聚物	19-229
酯类聚合物	
1. 由脂肪族多元羧酸和醇或酚制备的饱和聚酯	
双酚 A 型聚碳酸酯	19-230
己二酸邻苯二甲酸丁二醇和三醇制备的聚酯	19-231
2. 由芳香酸制备的饱和聚酯	
无油邻苯二甲酸聚酯	19-232
聚对苯二甲酸乙二醇酯	19-233
3. 可固化的不饱和聚酯树脂	
邻苯二甲酸己二酸马来酸酐制备的不饱和聚酯	19-234
四氢邻苯二甲酸和马来酸制备的不饱和聚酯	19-235
4. 四氯邻苯二甲酸和己二醇-1,6 制备的聚酯	19-236
5. 聚乙烯醇酯类	
聚乙酸乙烯酯	19-237
乙酸乙烯酯乙烯吡咯烷酮共聚物	19-238
乙酸乙烯酯十二酸乙烯酯共聚物	19-239
6. 聚丙烯酸酯类	
聚丙烯酸甲酯	19-240
聚丙烯酸乙酯	19-241
丙烯酸乙酯苯乙烯丙烯酸共聚物	19 242
丙烯酸乙酯苯乙烯丙烯酰胺共聚物	19-243
7. 聚甲基丙烯酸酯	
聚甲基丙烯酸甲酯	19-244
甲基丙烯酸甲酯丙烯腈共聚物	19-245
聚甲基丙烯酸正丁酯	19-246
聚甲基丙烯酸甲酯与环氧树脂共混	19-247
醚类聚合物	
1. 醚键在主链上的线性聚醚	
聚甲醛	19-248
聚氧化亚乙基(聚乙二醇)无定形	19-249
三氧杂环己烷和环氧乙烷共聚物	19-250
聚氧化亚丙基(聚丙二醇)	19-251
聚四氢呋喃	19-252
2. 醚键在侧链上的线性聚醚	
聚乙烯甲基醚	19-253
聚乙烯乙基醚	19-254
聚乙烯异丁基醚	19-255
聚乙烯异丙基醚	19-256
3. 聚合的缩醛和缩酮	
聚乙烯醇缩甲醛	19-257
与甲醛反应交联的聚乙烯醇	19-258
聚乙烯醇缩乙醛	19-259
4. 环氧树脂	
双酚 A 型环氧树脂	19-260
线性酚醛树脂与环氧氯丙烷反应产物	19-261
醇、醛、酮、酸、羧酸盐和酸酐聚合物	
1. 聚乙烯醇	
聚乙烯醇	19-262
聚乙烯醇(含有残留醋酸乙烯酯)	19-263
2. 聚合的羧酸羧酸盐	
丙烯酸丙烯酸酯共聚物	19-264
聚丙烯酸	19-265
聚丙烯酸钠	19-266
聚甲基丙烯酸	19-267
聚甲基丙烯酸钾	19-268
聚马来酸酐	19-269
3. 醛酮树脂	
乙醛树脂	19-270
丙酮甲醛树脂	19-271
丁酮甲醛树脂	19-272
环己酮甲醛树脂	19-273
酚醛树脂	
1. 线性酚醛树脂及固化产物	
线性苯酚甲醛树脂(1,2,6 取代)	19-274
线性苯酚甲醛树脂(1,2,4 取代)	19-275
线性苯酚甲醛树脂与六次甲基四胺混合物	19-276
线性甲酚甲醛树脂	19-277
未改性、可固化的苯酚甲醛综合产物	19-278
2. 甲阶酚醛树脂及其固化产物	
甲阶甲酚甲醛树脂	19-279
间苯二酚甲醛树脂	19-280
3. 烷基酚和苯基苯酚甲醛树脂	
叔丁基酚甲醛树脂	19-281
叔辛基酚甲醛树脂	19-282
4. 醚化和增塑的酚醛树脂	
丁基醚化甲阶酚醛树脂	19-283
油改性酚醛树脂	19-284
含氮聚合物	
1. 聚胺聚亚胺及其同系物	
脂环族聚胺混合物	19-285
聚乙烯基吡啶	19-286
聚乙烯基咔唑	19-287
2. 氨基树脂	
苯胺甲醛树脂	19-288
三聚氰胺甲醛树脂	19-289
丁氧基化三聚氰胺甲醛树脂	19-290
脲甲醛树脂	19-291

续表

聚合物	谱图号
3. 酰胺基在主链上的聚酰胺	
3-聚酰胺(α型)	19-292
6-聚酰胺(β型)	19-293
聚酰胺-66和聚酰胺6(9:1)共聚物	19-294
5,7-聚酰胺(α/β型)	19-295
6,1-聚酰胺	19-296
6,6-聚酰胺	19-297
6,10-聚酰胺	19-298
6,it-聚酰胺	19-299
4. 酰胺基在侧链上的聚酰胺	
聚丙烯酰胺	19-300
聚甲基丙烯酰胺(溴化钾压片)	19-301
聚乙烯吡咯烷酮	19-302
乙烯吡咯烷酮乙酸乙烯酯共聚物	19-303
5. 聚脲	
聚脲-9$\{(CH_2)_9NHCONH\}_n$	19-304
6. 聚酰亚胺	
均苯四甲酸二酐与4,4′-二氨基苯甲烷制备的聚酰胺酸	19-305
均苯四甲酸二酐与4,4′-二氨基二苯甲烷制备的聚酰亚胺	19-306
7. 聚氨基甲酸酯	
甲苯二异氰酸酯与三羟苯基丙烷制备的三异氰酸酯-氨基甲酸酯	19-307
六亚甲基二异氰酸酯与1,4-丁二醇制备的聚氨基甲酸酯	19-308
4,4′-二苯基甲烷二异氰酸酯与1,6-己二醇制备的聚氨基甲酸酯	19-309
1,5-萘二异氰酸酯与乙二醇制备的聚氨基甲酸酯	19-310
8. 含腈基的聚合物	
聚丙烯腈	19-311
聚氰基丙烯酸酯	19-312
含硅聚合物	
1. 硅油	
甲基氢硅油	19-313
甲基硅油	19-314
聚二甲基二苯基硅氧烷	19-315
聚甲基苯基硅氧烷	19-316
二甲基硅氧烷二元醇共聚物	19-317
硬脂酸锂填充[Me_2SiO($PhMeSiO$)(Me_3SiO)]共聚物	19-318
2. 硅树脂	
聚二甲基硅氧烷树脂	19-319
聚二甲基二苯基硅氧烷树脂	19-320
3. 硅橡胶	
甲基硅橡胶	19-321
聚二甲基硅氧烷橡胶(已硫化的)	19-322
含Me_2SiO和$PhMeSiO$单元的硅橡胶(已硫化)	19-323
含有$F_3(CH_2CH_2(Me)SiO)$单元的硅橡胶(已硫化)	19-324
含硫聚合物	
1. 聚砜	
双酚A与4,4′-二羟基二苯砜制备的芳香族聚砜	19-325
苯乙烯-SO_2共聚物	19-326
聚二苯醚砜	19-327
2. 氯磺化聚乙烯	
氯磺化聚乙烯	19-328
3. 聚硫醚类	
聚亚乙基四硫化物	19-329
聚硫橡胶	19-330
聚苯硫醚	19-331
4. 含氮和硫聚合物	
硫脲甲醛树脂	19-332
对甲苯磺酰胺甲醛树脂	19-333
天然产物	
1. 天然树脂	
松香酸	19-334
虫胶	19-335
2. 天然树脂改性产物	
歧化松香	19-336
马来酸酐和松香酸加成物	19-337
松香改性的酚类树脂	19-338
3. 多肽	
丝(多肽)	19-339
羊毛	19-340
酪朊	19-341
交联酪朊	19-342
明胶	19-343
4. 纤维素	
纤维素 I	19-344
纤维素 II	19-345
再生纤维素	19-346
5. 纤维素酯	
一乙酸纤维素酯	19-347
三乙酸纤维素酯	19-348
三丙酸纤维素酯	19-349
三丁酸纤维素酯	19-350
乙酸丁酸纤维素酯	19-351
硝酸纤维素酯	19-352
6. 纤维素醚和其他纤维素衍生物	
甲基纤维素	19-353
乙基纤维素	19-354
羟乙基纤维素	19-355
羧甲基纤维素钠盐	19-356
甲基羟乙基纤维素	19-357
乙基羟乙基纤维素	19-358
苄基纤维素	19-359
氰基乙基纤维素	19-360
7. 工业石油沥青和木沥青	
地沥青	19-361
煤焦油沥青	19-362
褐煤焦油沥青	19-363

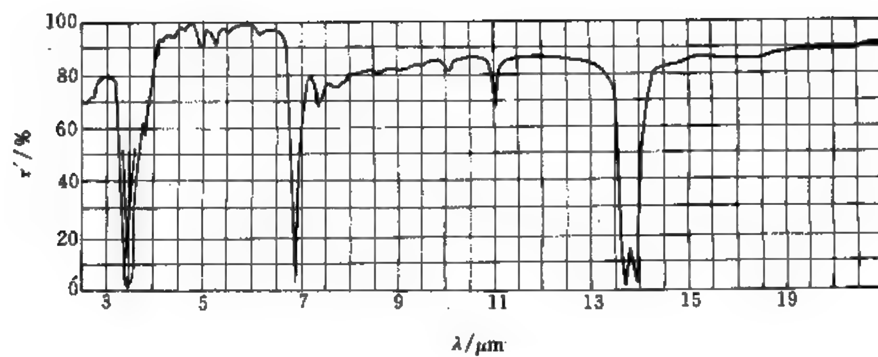


图 19-184　聚乙烯的红外光谱(热压薄膜)

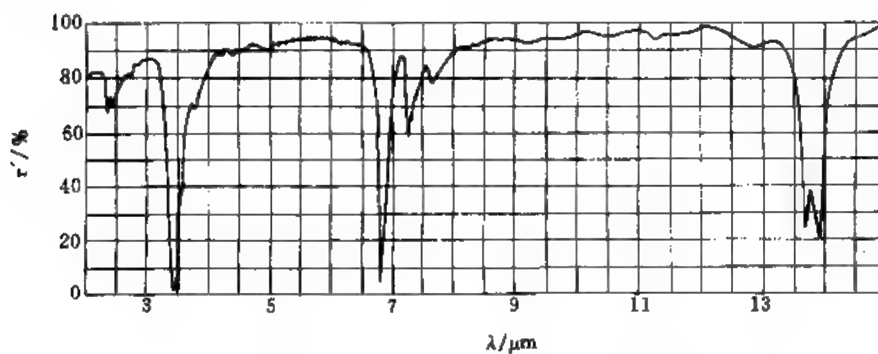


图 19-185　高压聚乙烯的红外光谱(热压薄膜)

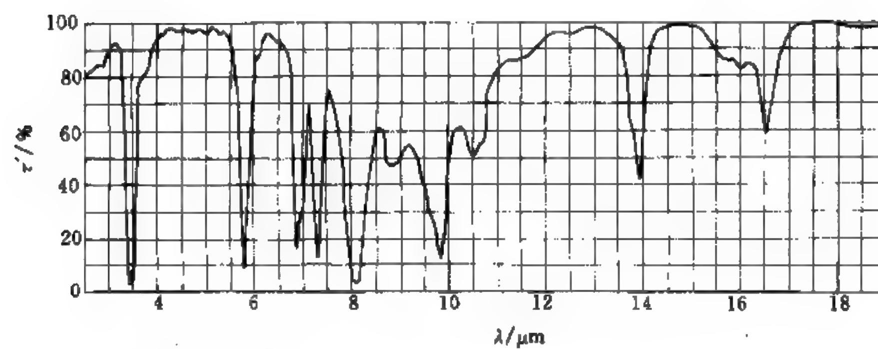


图 19-186　乙烯醋酸乙烯酯共聚物的红外光谱(热压薄膜)

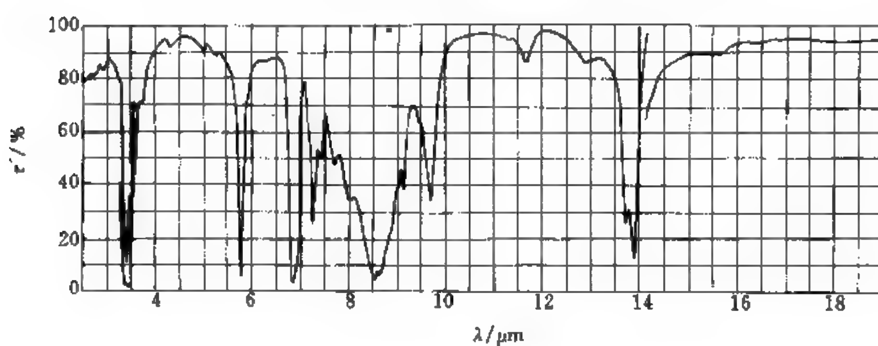


图 19-187　乙烯丙烯酸乙酯共聚物的红外光谱(热压薄膜)

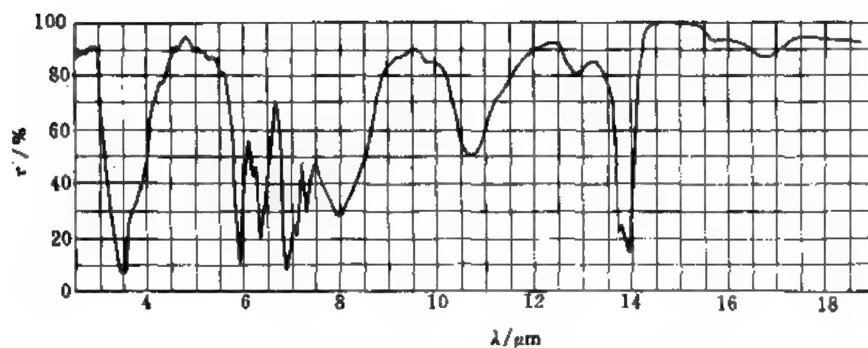


图 19-188 乙烯丙烯酸丙烯酸盐共聚物的红外光谱(熔融薄膜)

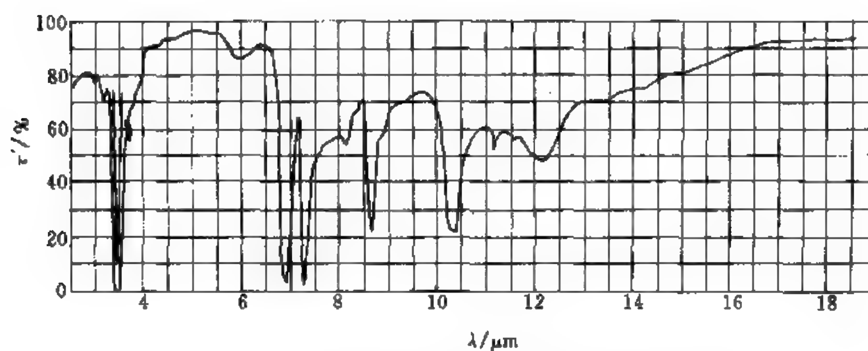


图 19-189 无规聚丙烯的红外光谱(氯化钠晶片间薄膜)

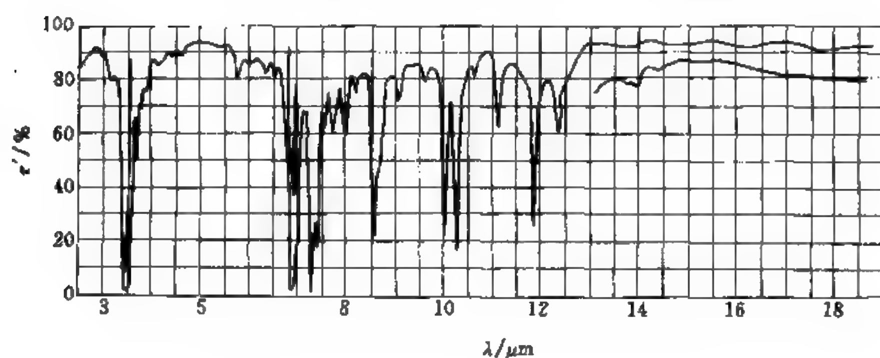


图 19-190 等规聚丙烯的红外光谱(热压薄膜)

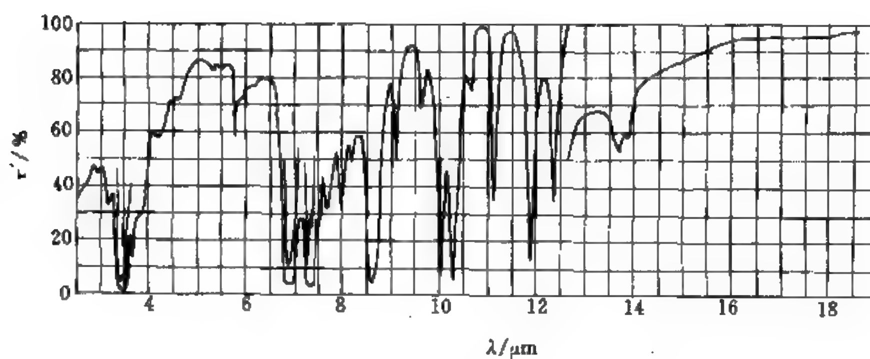


图 19-191 丙烯乙烯共聚物的红外光谱(熔融薄膜)

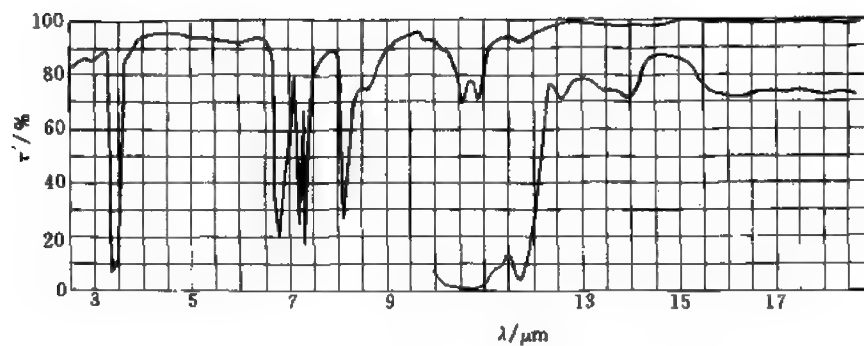


图 19-192 聚异丁烯的红外光谱(二硫化碳溶液流延薄膜)

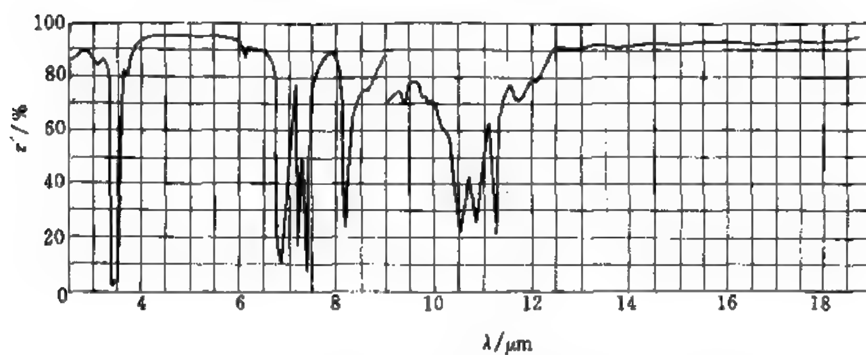


图 19-193 低分子量聚异丁烯的红外光谱(溴化钾片上薄膜)

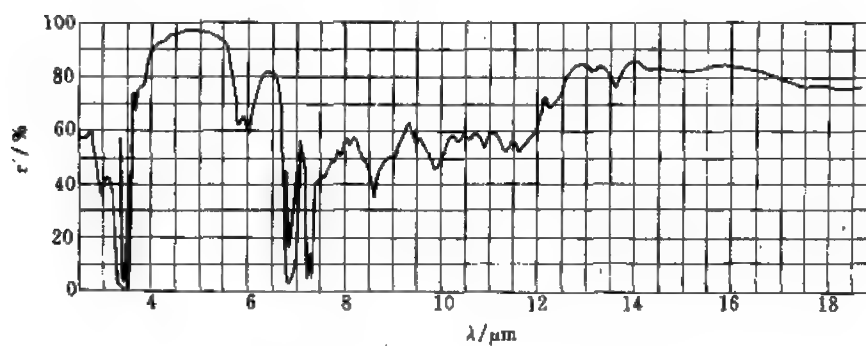


图 19-194 萜烯树脂的红外光谱(溴化钾压片)

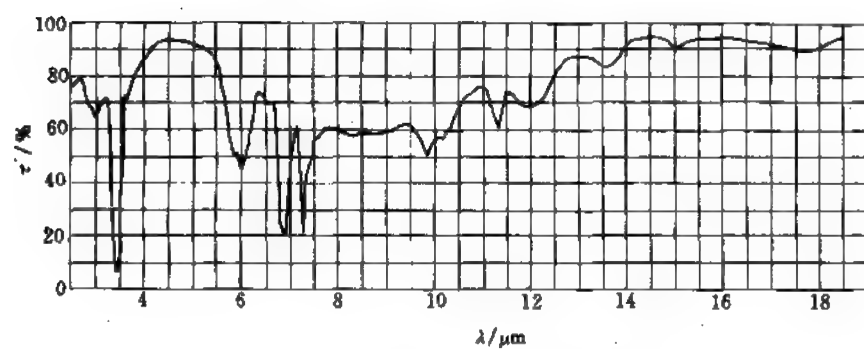


图 19-195 环化橡胶的红外光谱(熔融薄膜)

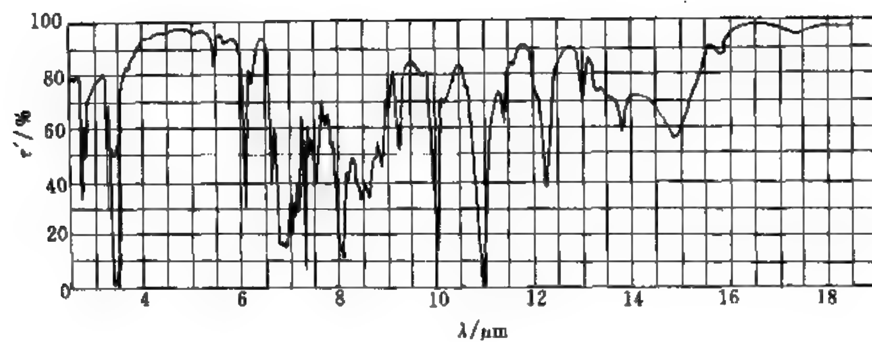


图 19-196　1,2-聚丁二烯的红外光谱(在氯化银板间热压薄膜)

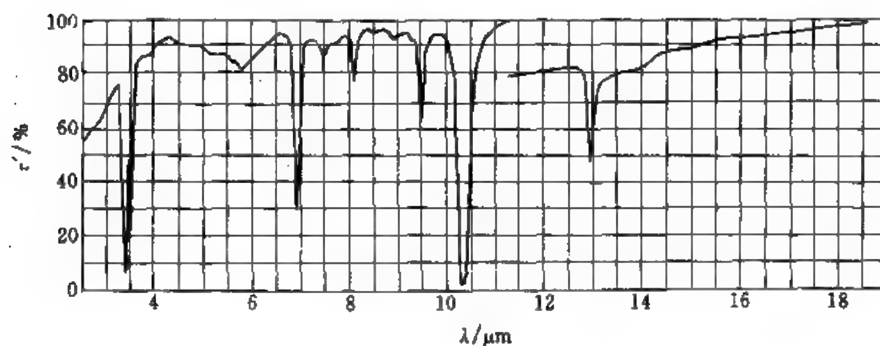


图 19-197　1,4-聚丁二烯(反式)的红外光谱(在氯化银板上热压薄膜)

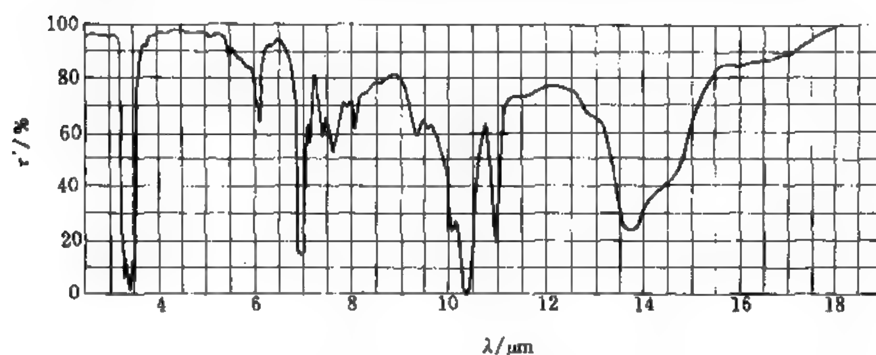


图 19-198　聚丁二烯(67%1,4 反式,20%1,4-顺式和 12%1,2 结构)(热压薄膜)

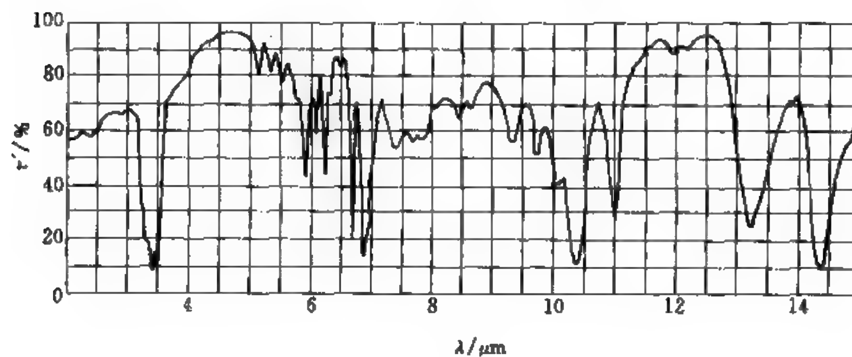


图 19-199　丁二烯苯乙烯共聚物的红外光谱(二氯甲烷溶液流延薄膜)

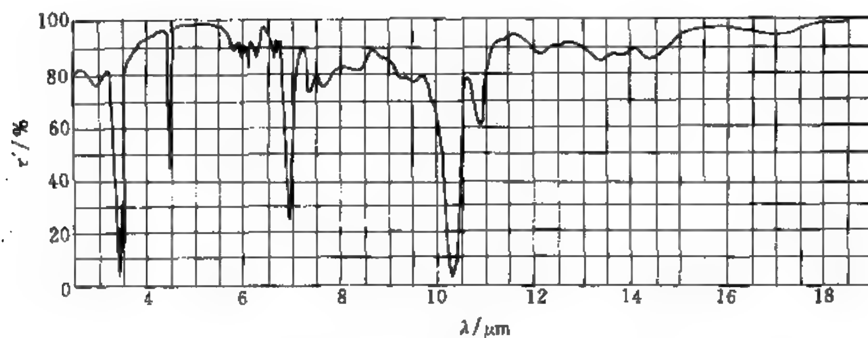


图 19-200　丁二烯丙烯腈共聚物的红外光谱(胶乳在氯化银板上流延薄膜)

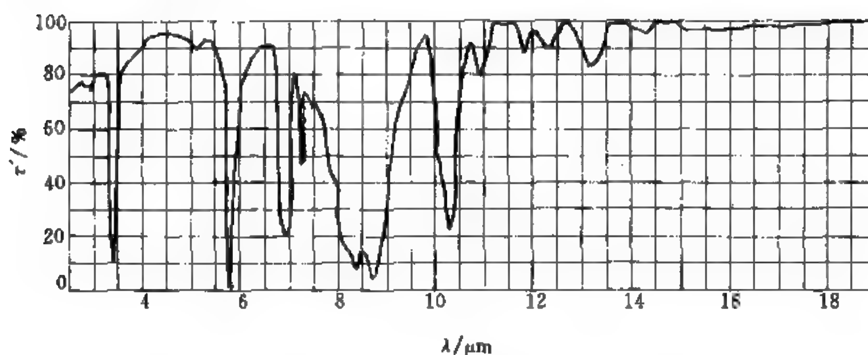


图 19-201　甲基丙烯酸甲酯丁二烯共聚物的红外光谱(胶乳在氯化银板上流延薄膜)

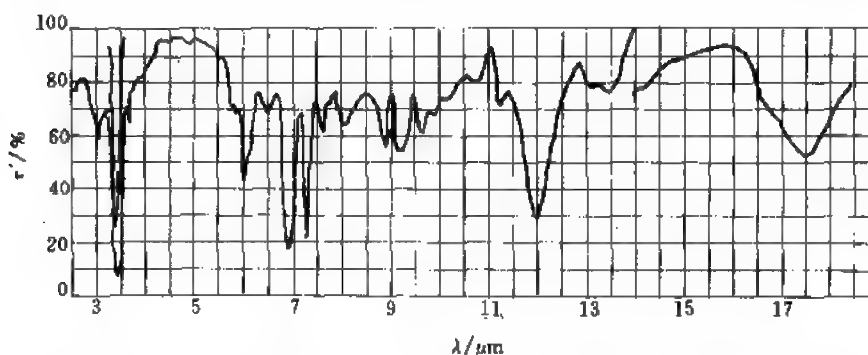


图 19-202　顺式 1,4-聚异戊二烯(无定形)的红外光谱(在氯化银板间热压薄膜)

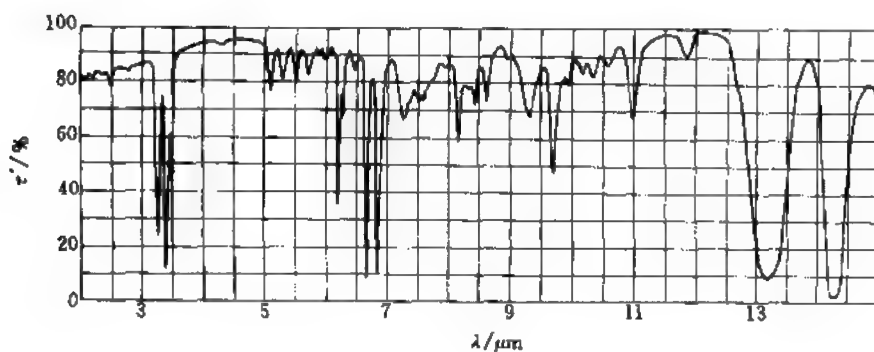


图 19-203　聚苯乙烯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

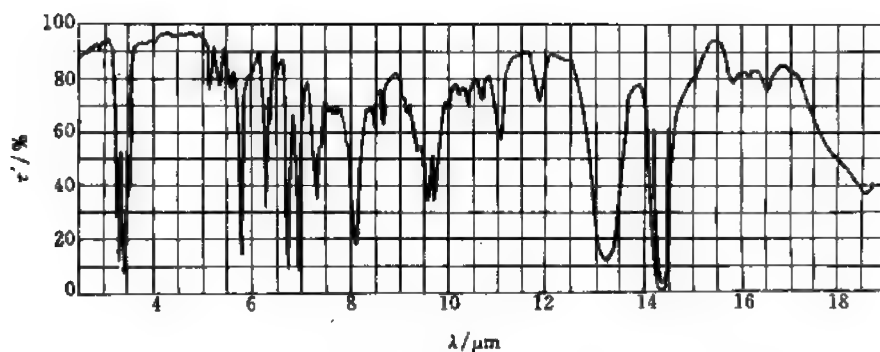


图 19-204 苯乙烯乙酸乙烯酯共聚物的红外光谱(醋酸乙酯溶液流延薄膜)

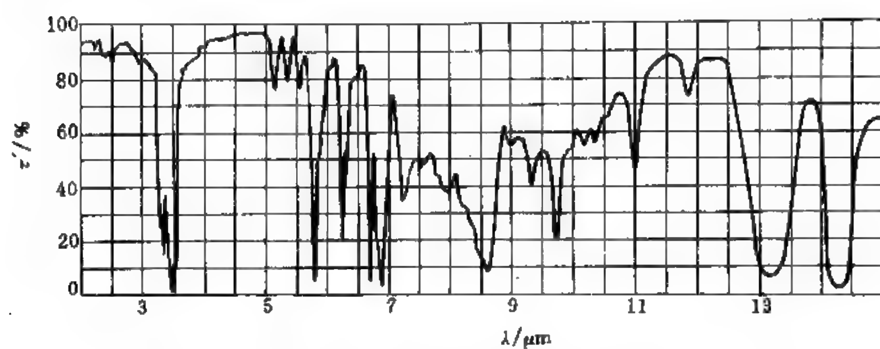


图 19-205 苯乙烯丙烯酸酯共聚物的红外光谱(熔融薄膜)

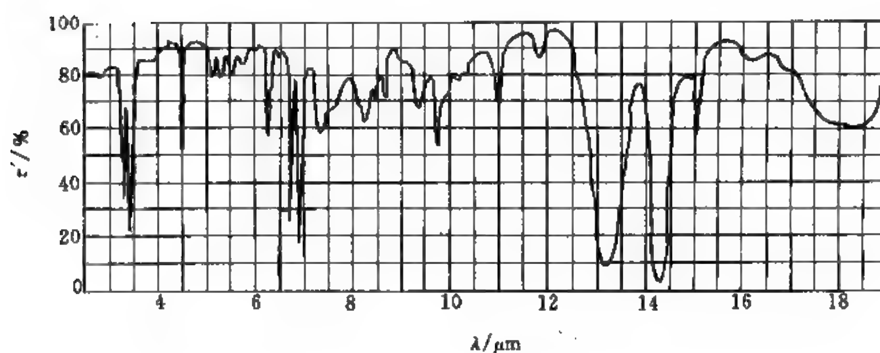


图 19-206 苯乙烯丙烯腈(70+30)共聚物的红外光谱(热压薄膜)

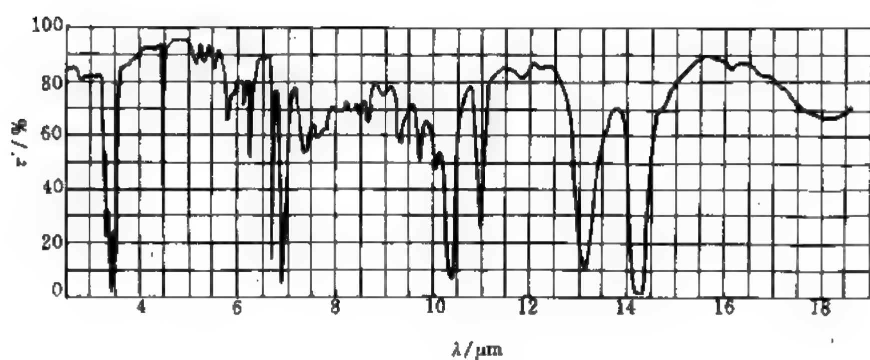


图 19-207 苯乙烯丙烯腈丁二烯共聚物的红外光谱(薄膜)

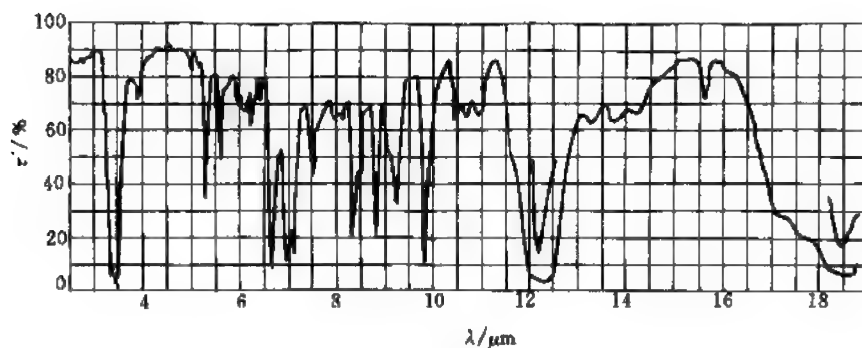


图 19-208　聚对二甲苯的红外光谱(薄膜 100μm,溴化钾压片)

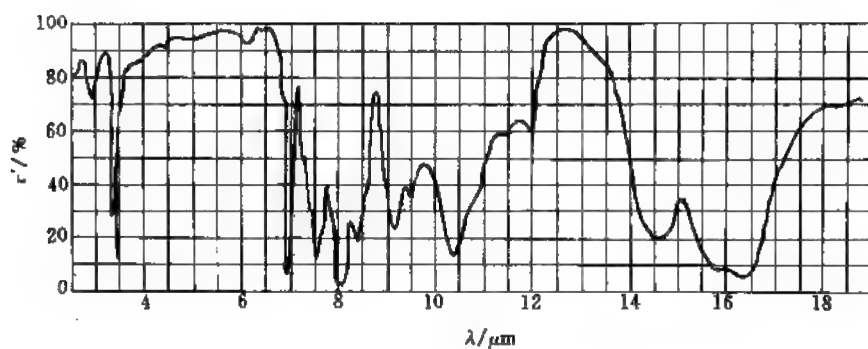


图 19-209　聚氯乙烯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

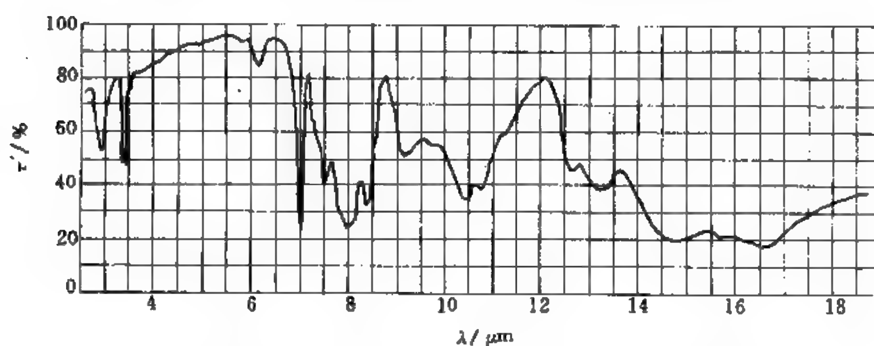


图 19-210　氯化聚氯乙烯(65%Cl)的红外光谱(热压薄膜)

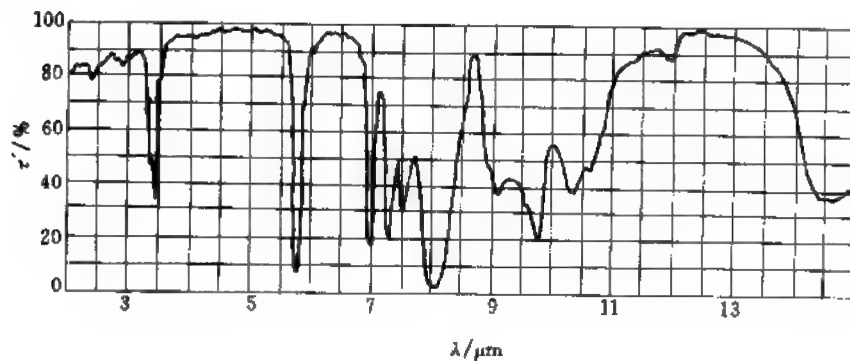


图 19-211　氯乙烯乙酸乙烯酯共聚物的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

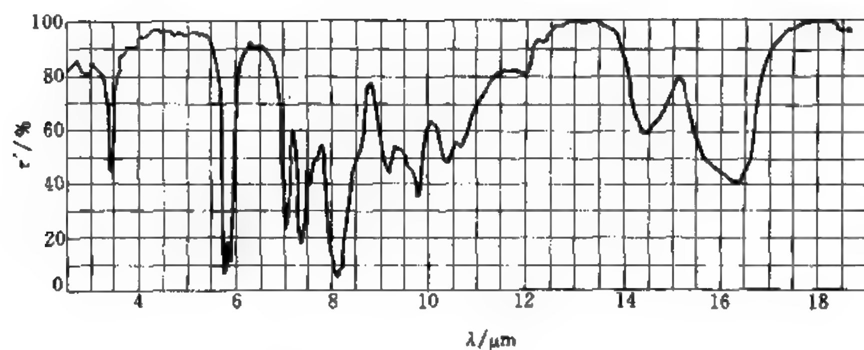


图 19-212 氯乙烯乙酸乙烯酯马来酸半酯共聚物的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

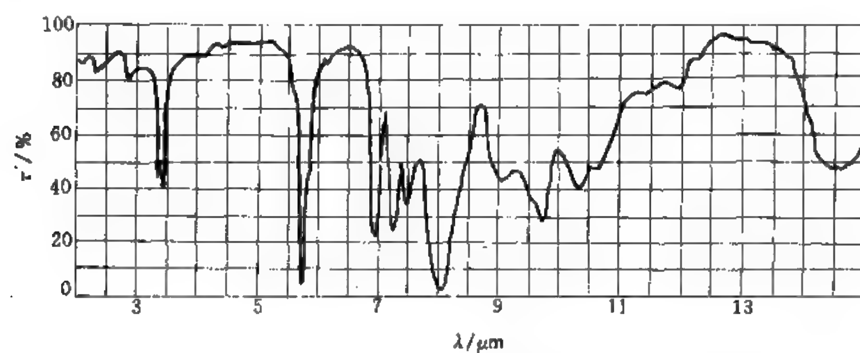


图 19-213 氯乙烯乙酸乙烯马来酸酐共聚物的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

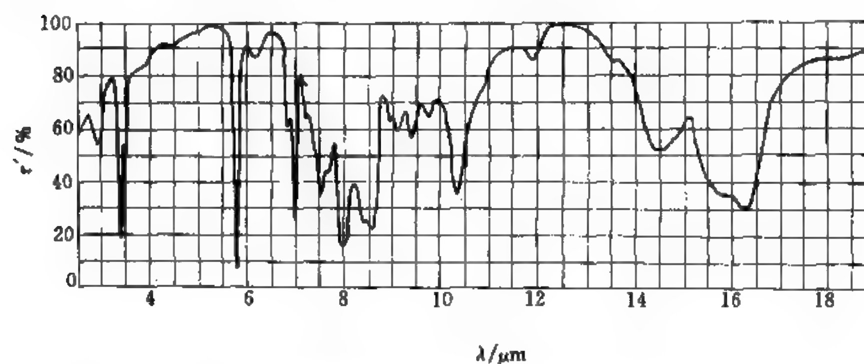


图 19-214 氯乙烯和酯类单体的共聚物的红外光谱(溴化钾压片)

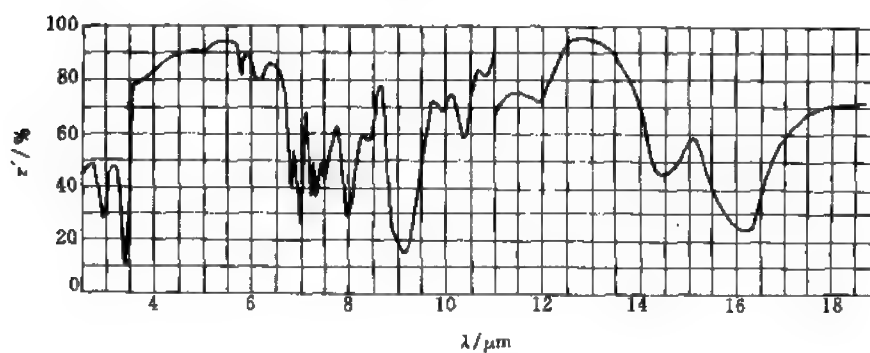


图 19-215 氯乙烯和乙烯异丁基醚共聚物的红外光谱(溴化钾压片)

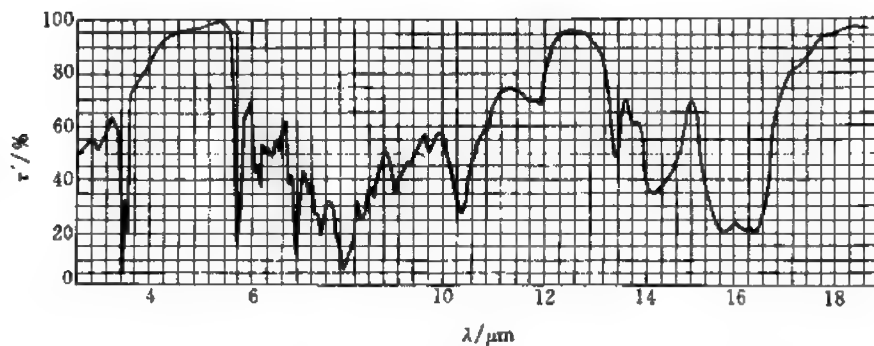


图 19-216　氯乙烯和酯类化合物共聚物的红外光谱(CH_2Cl_2 溶液流延薄膜)

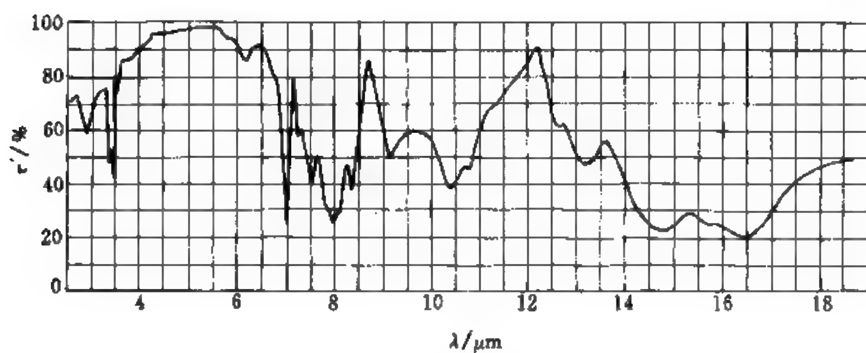


图 19-217　氯化聚氯乙烯的红外光谱(溴化钾压片)

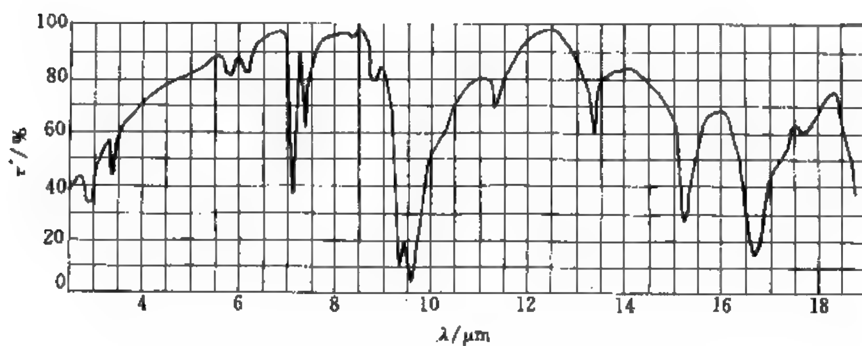


图 19-218　聚偏二氯乙烯的红外光谱(溴化钾压片)

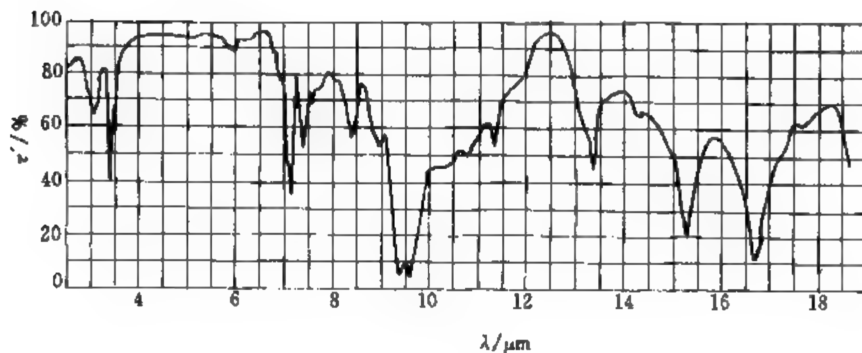


图 19-219　偏二氯乙烯氯乙烯共聚物的红外光谱(四氢呋喃溶液流延薄膜)

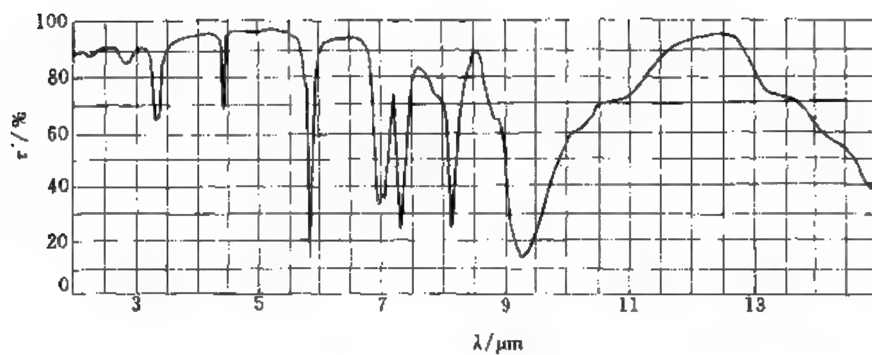


图 19-220　偏二氯乙烯丙烯腈醋酸乙烯酯共聚物的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

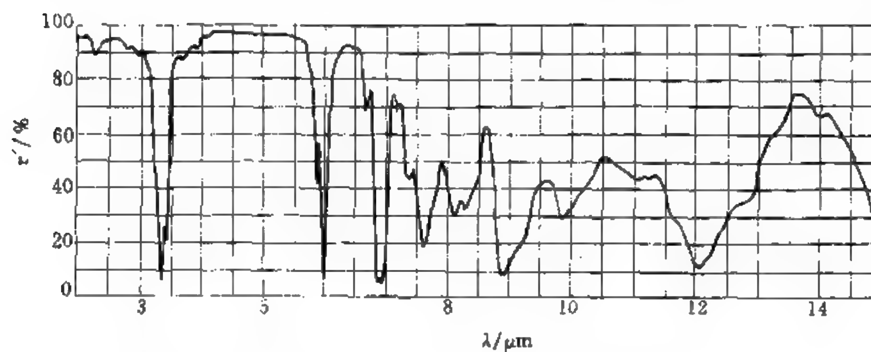


图 19-221　聚 2-氯丁二烯的红外光谱(氯化银板间热压薄膜)

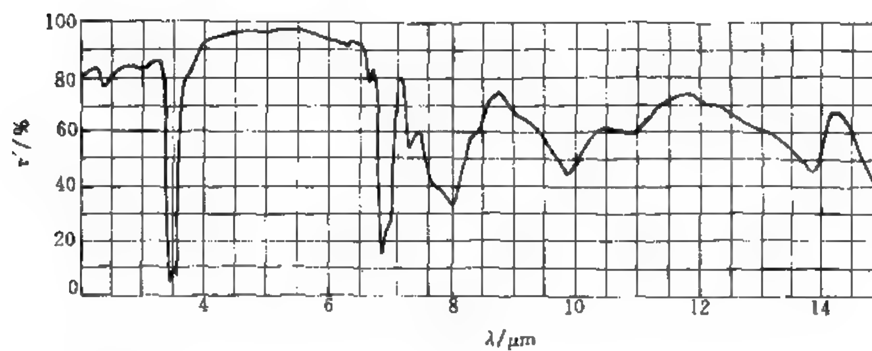


图 19-222　氯化高压聚乙烯(31%Cl)的红外光谱(氯仿溶液流延薄膜)

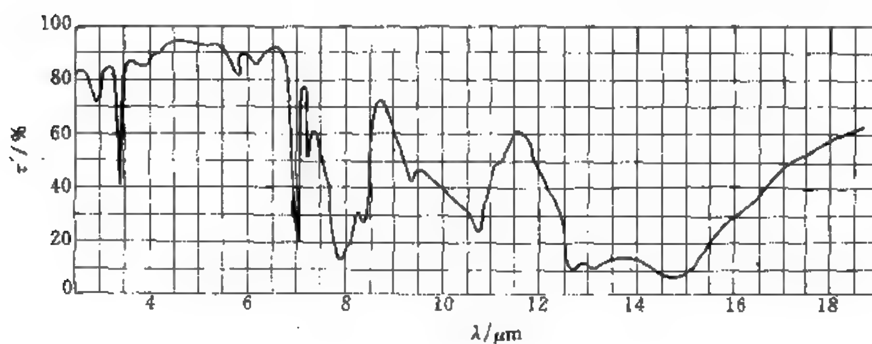


图 19-223　高氯化聚乙烯的红外光谱(溴化钾压片)

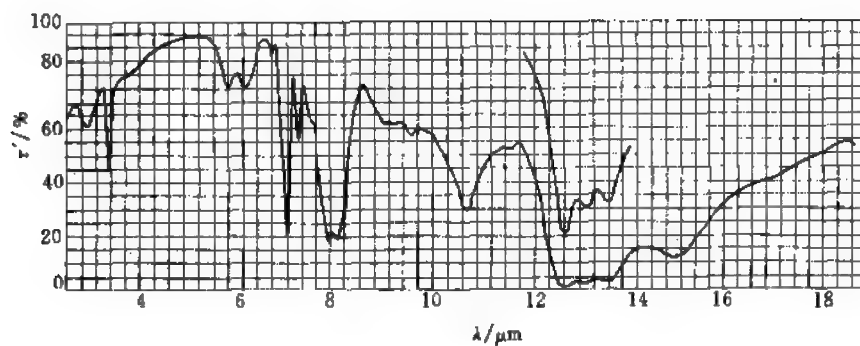


图 19-224 氯化橡胶的红外光谱(苯溶液流延薄膜)

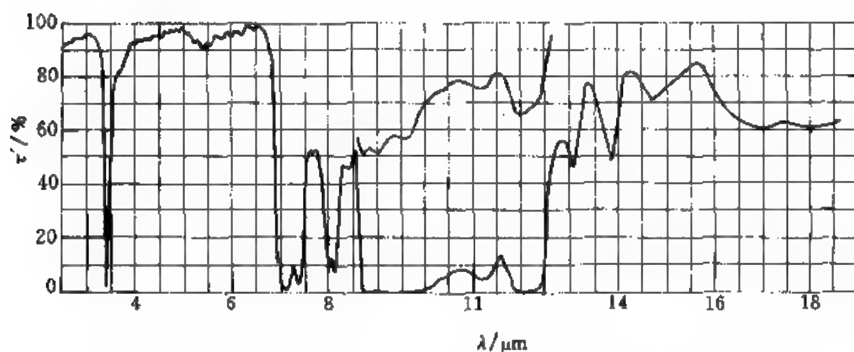


图 19-225 聚氯乙烯的红外光谱(二甲基甲酰胺溶液流延薄膜)

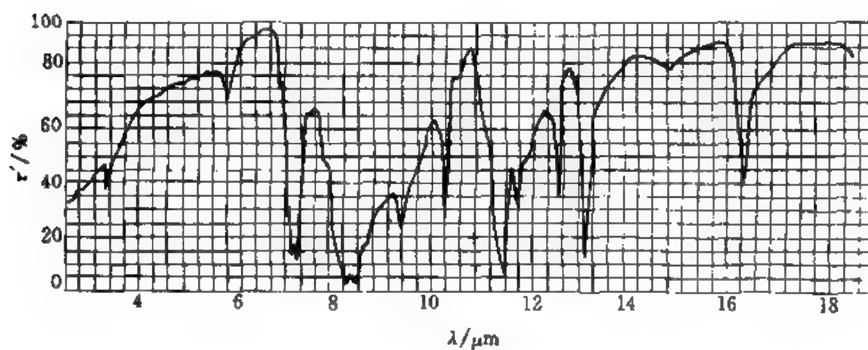


图 19-226 聚偏二氯乙烯的红外光谱(二甲基甲酰胺溶液流延薄膜)

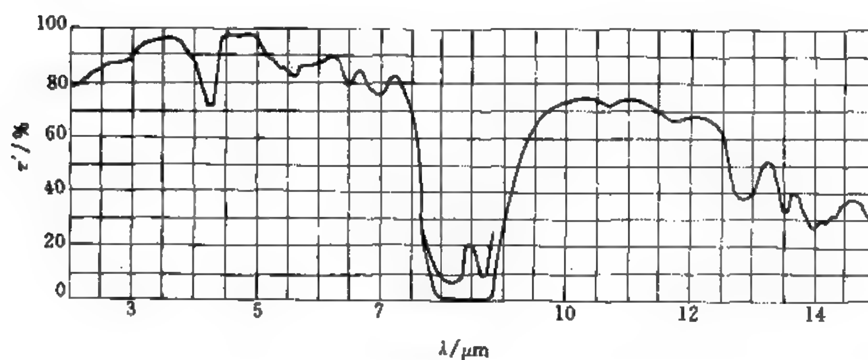


图 19-227 聚四氟乙烯的红外光谱(厚层:切片,薄层:水悬浮液在氯化银板上流延薄膜)

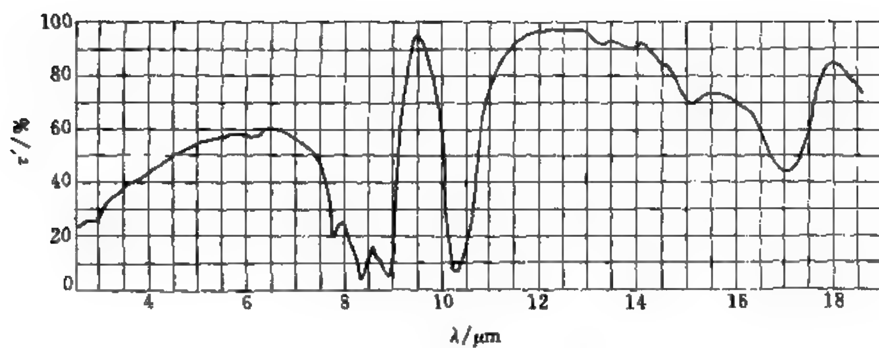


图 19-228 聚三氟氯乙烯的红外光谱(溴化钾压片)

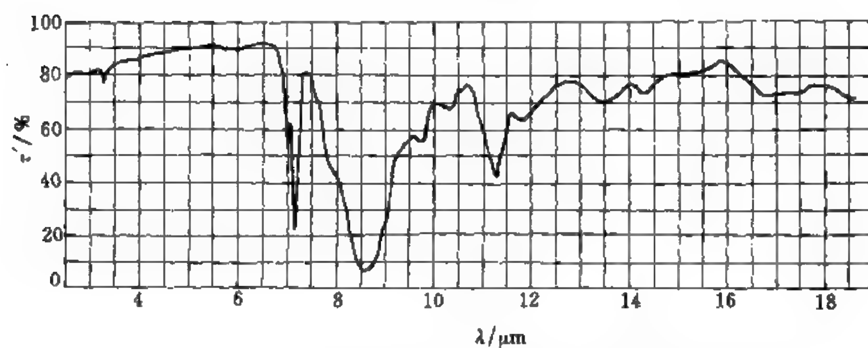


图 19-229 偏二氯乙烯共聚物的红外光谱(氯化银板间热压薄膜)

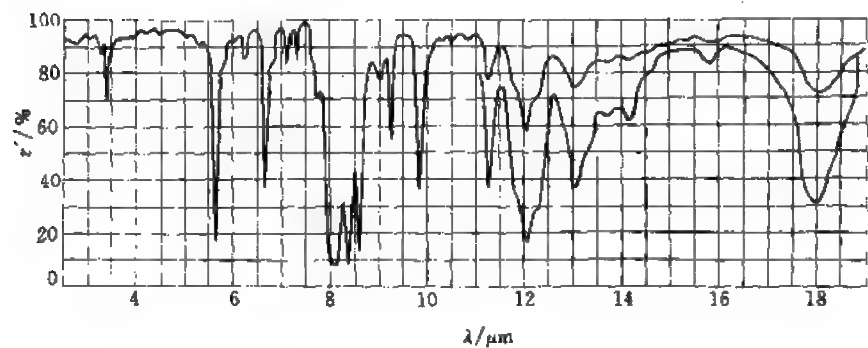


图 19-230 双酚 A 型聚碳酸酯的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

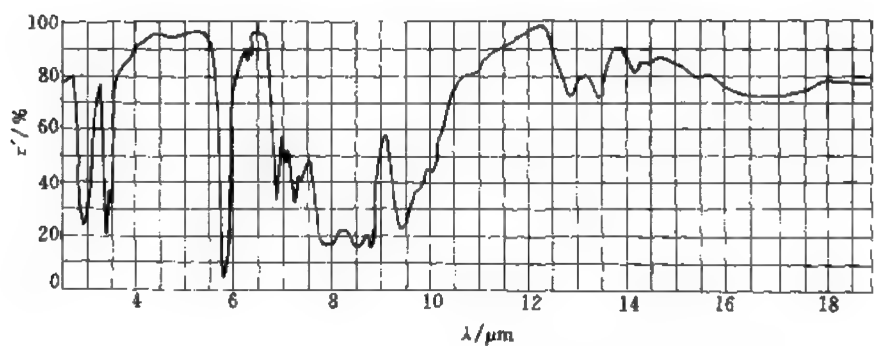


图 19-231 己二酸邻苯二甲酸丁二醇和三醇制备的聚酯的红外光谱(溴化钾晶片间薄膜)

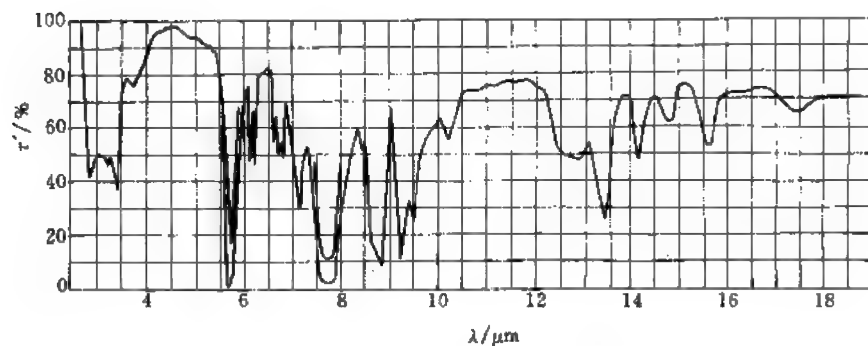


图 19-232　无油邻苯二甲酸聚酯的红外光谱(溴化钾压片)

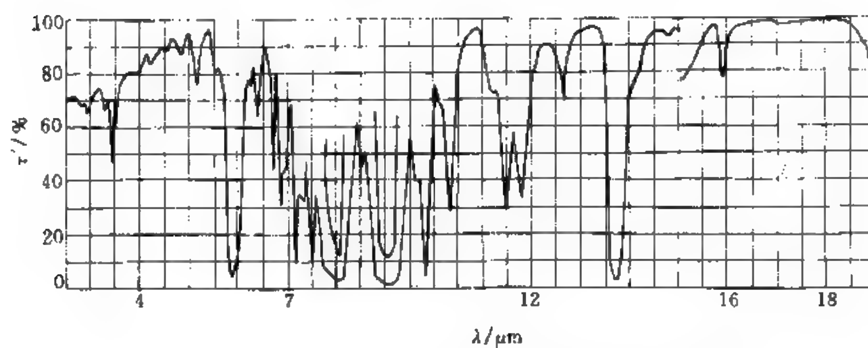


图 19-233　聚对苯二甲酸乙二醇酯的红外光谱(拉伸薄膜)

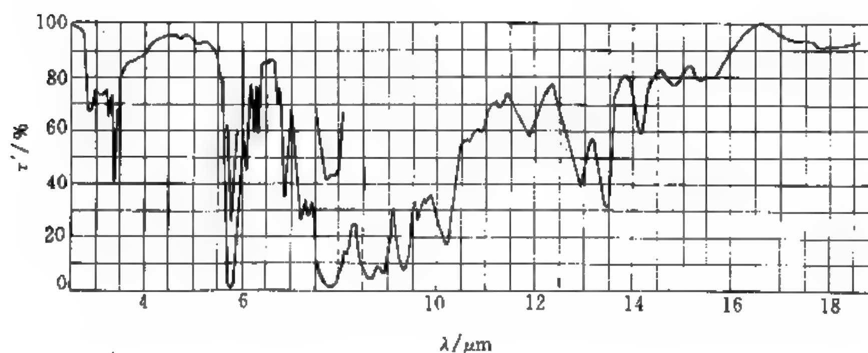


图 19-234　邻苯二甲酸己二酸马来酸酐制备的不饱和聚酯的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

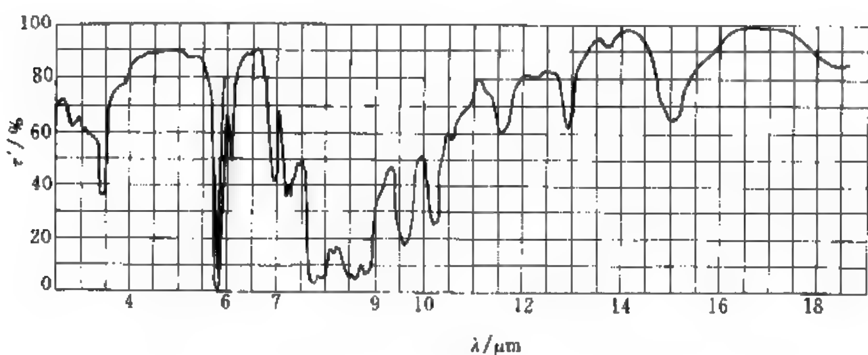


图 19-235　四氢邻苯二甲酸和马来酸制备的不饱和聚酯的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

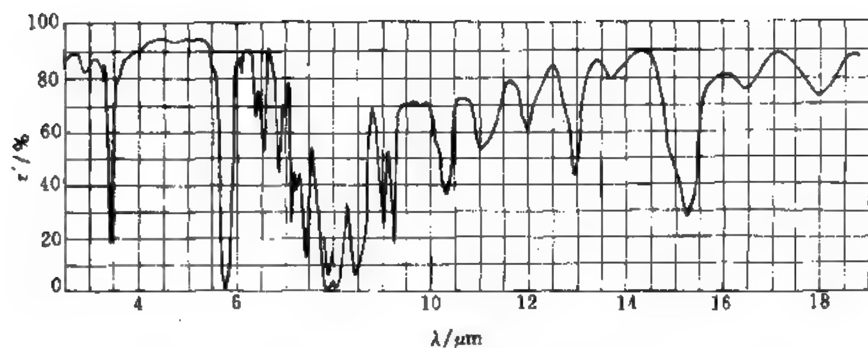


图 19-236 四氯邻苯二甲酸和 1,6-己二醇制备的聚酯的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

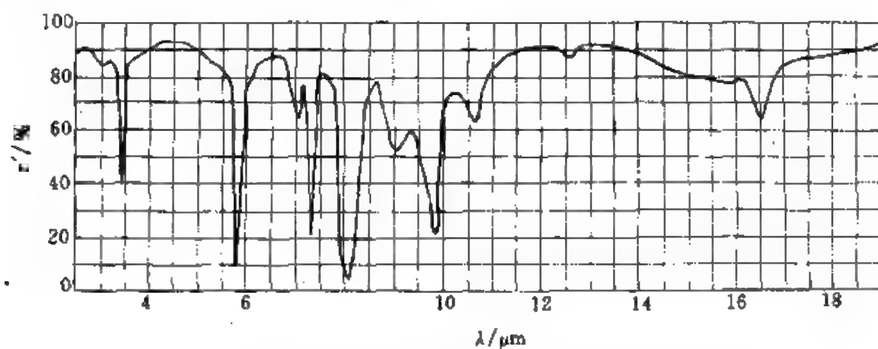


图 19-237 聚乙酸乙烯酯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

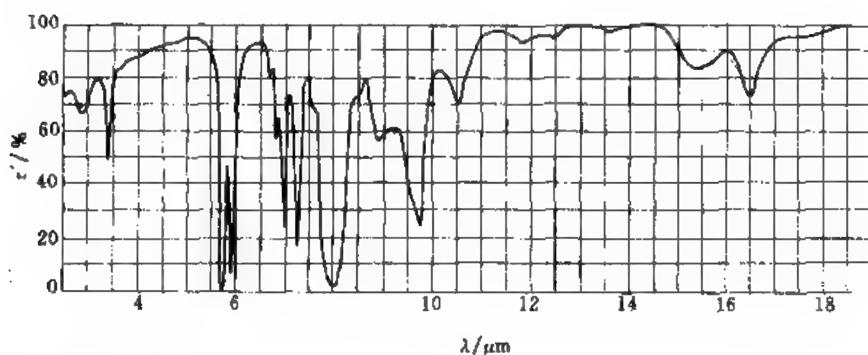


图 19-238 乙酸乙烯酯乙烯吡咯烷酮共聚物的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

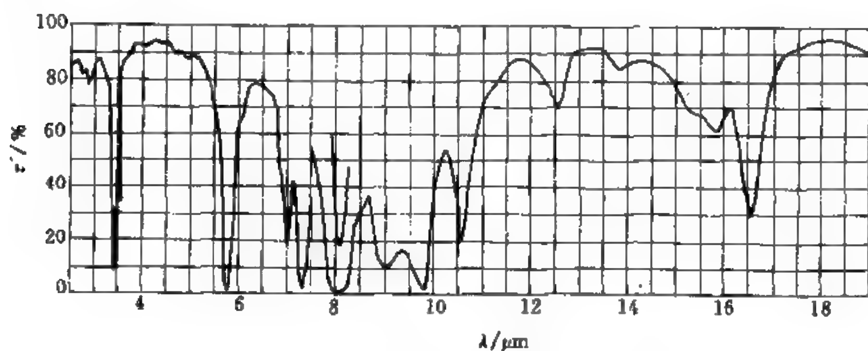


图 19-239 乙酸乙烯酯十二酸乙烯酯共聚物的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

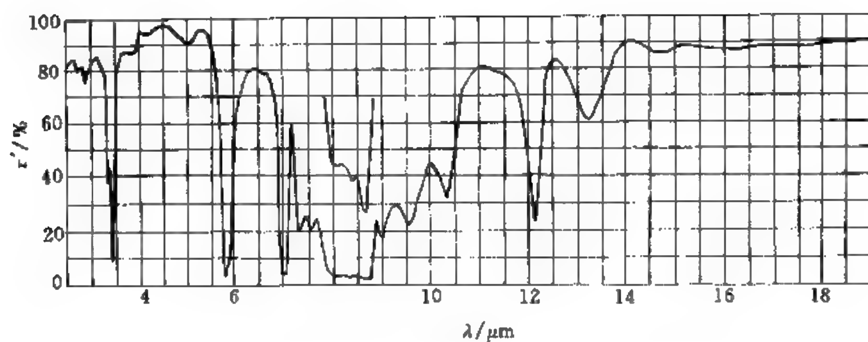


图 19-240　聚丙烯酸甲酯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

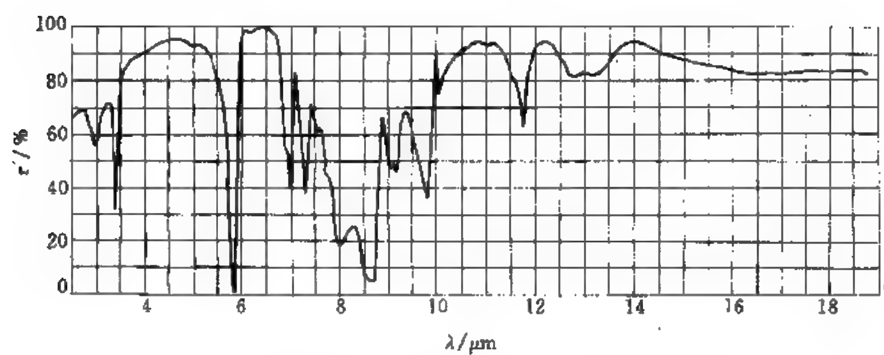


图 19-241　聚丙烯酸乙酯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

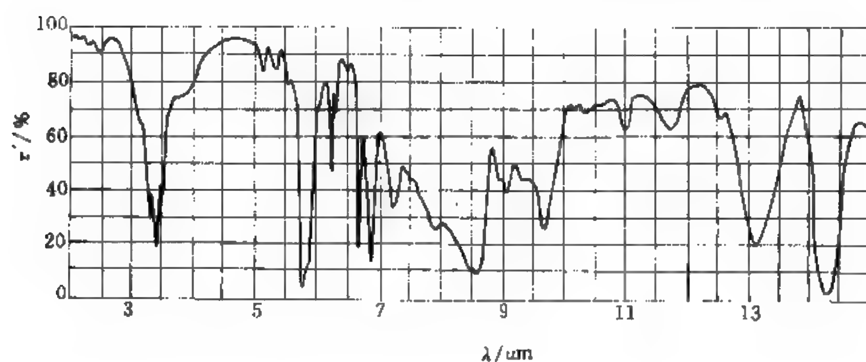


图 19-242　丙烯酸乙酯苯乙烯丙烯酸共聚物的红外光谱(氯化钠晶片上薄膜)

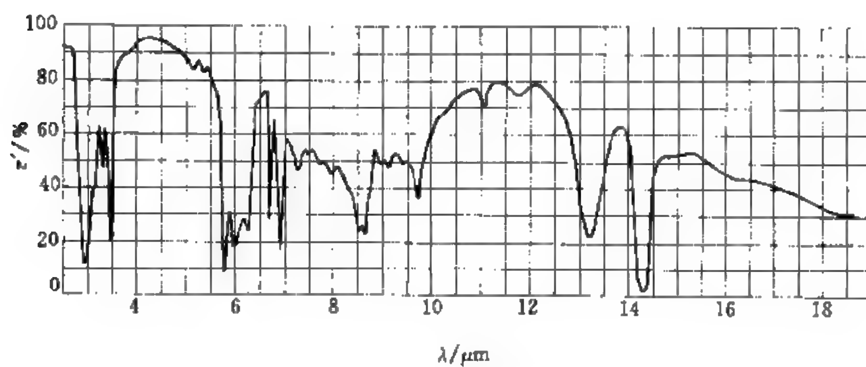


图 19-243　丙烯酸乙脂苯乙烯丙烯酰胺共聚物的红外光谱(KBr 压片)

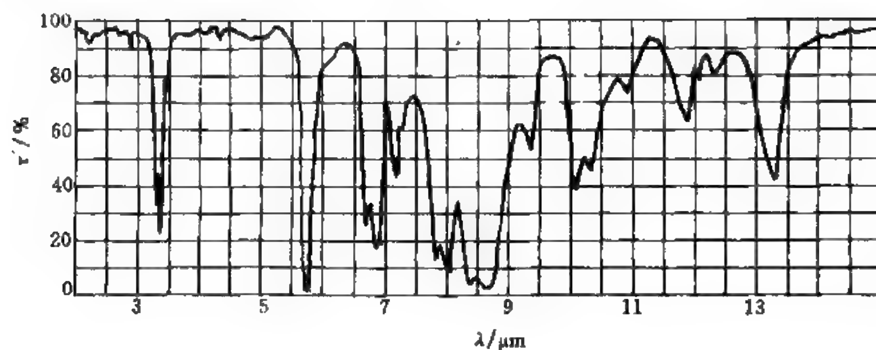


图 19-244 聚甲基丙烯酸甲酯的红外光谱(厚层:热压、薄层:二氯乙烷溶液流延薄膜)

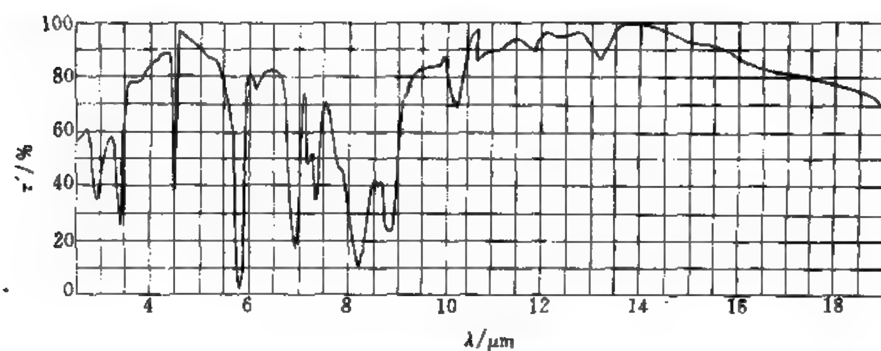


图 19-245 甲基丙烯酸甲酯丙烯腈共聚物的红外光谱(溴化钾压片)

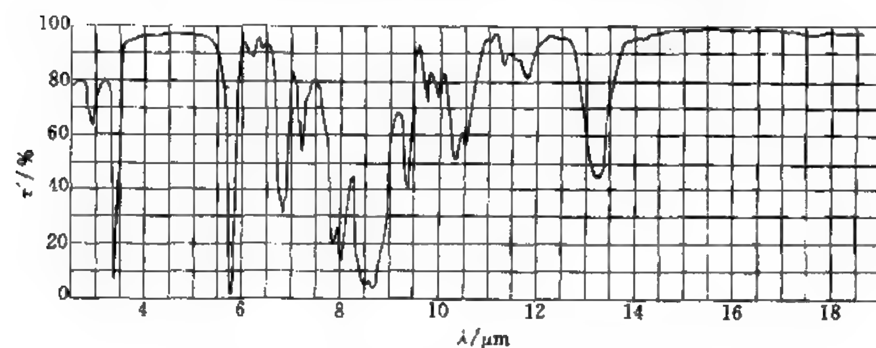


图 19-246 聚甲基丙烯酸正丁酯的红外光谱

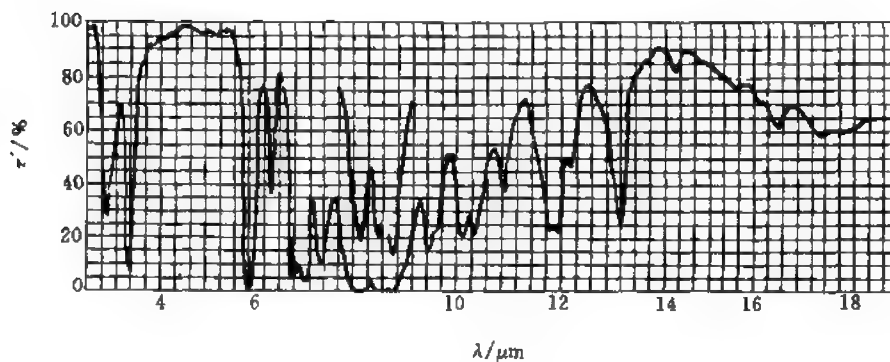


图 19-247 聚甲基丙烯酸甲酯与环氧树脂共混的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

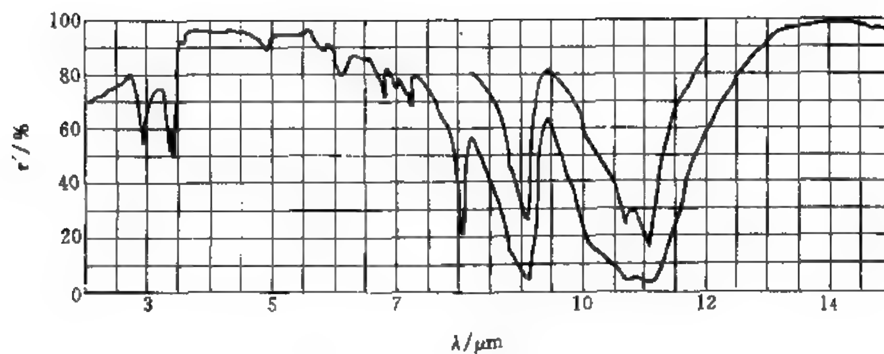


图 19-248 聚甲醛的红外光谱(薄层:溴化钾压片,厚层:冷压)

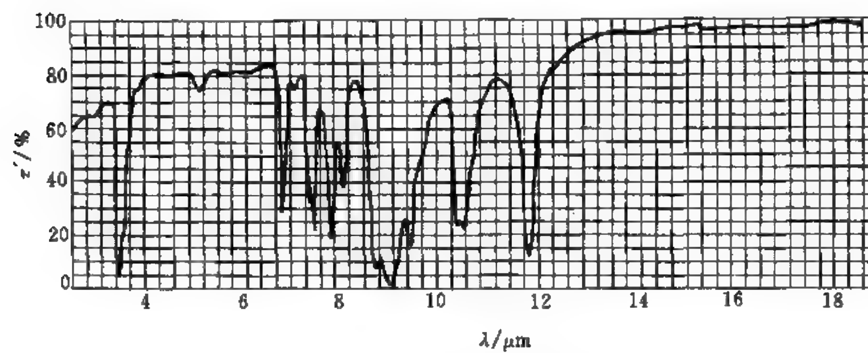


图 19-249 聚氧化亚乙基(聚乙二醇)的红外光谱(无定形,两块盐片间液膜)

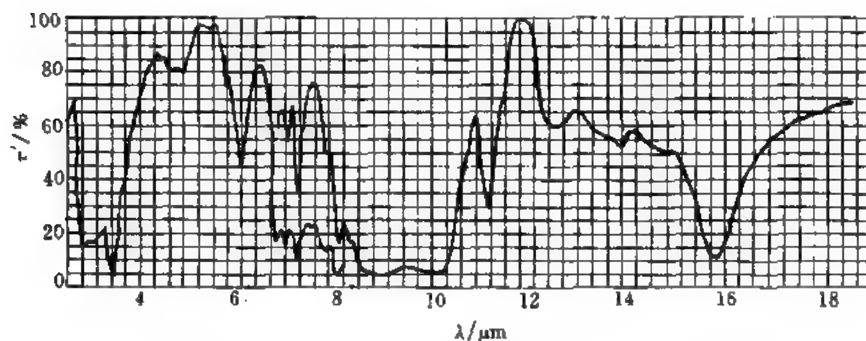


图 19-250 三氧杂环己烷和环氧乙烷共聚物的红外光谱(熔融膜)

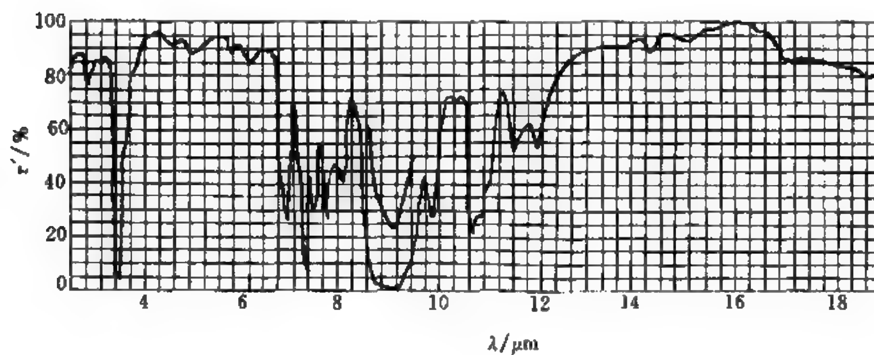


图 19-251 聚氧化亚丙基(聚丙二醇)的红外光谱(两块盐片间液膜)

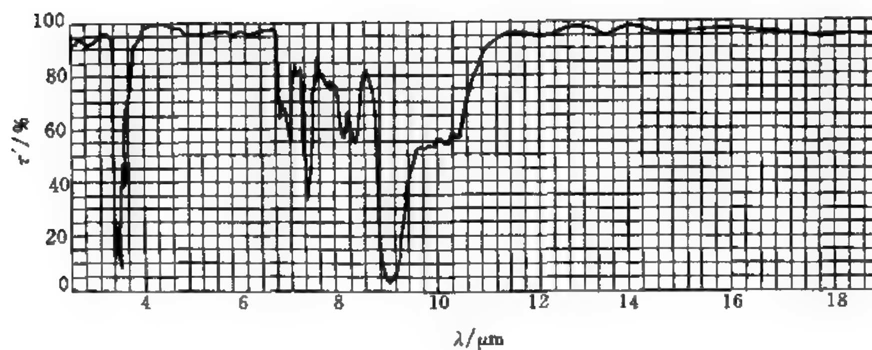


图 19-252 聚四氢呋喃(低分子量、无定形)的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

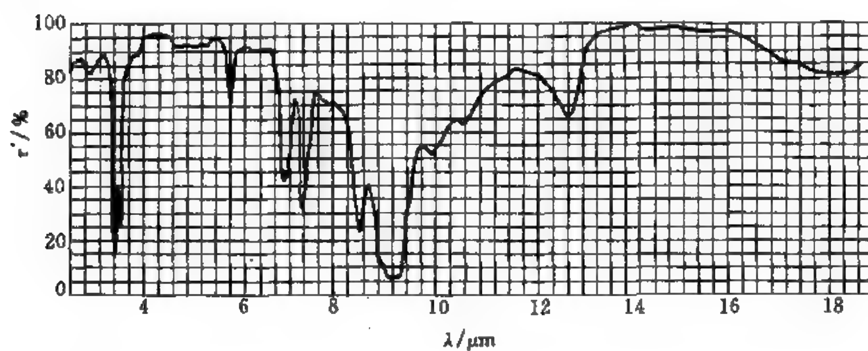


图 19-253 聚乙烯甲基醚的红外光谱(醋酸乙酯溶液流延薄膜)

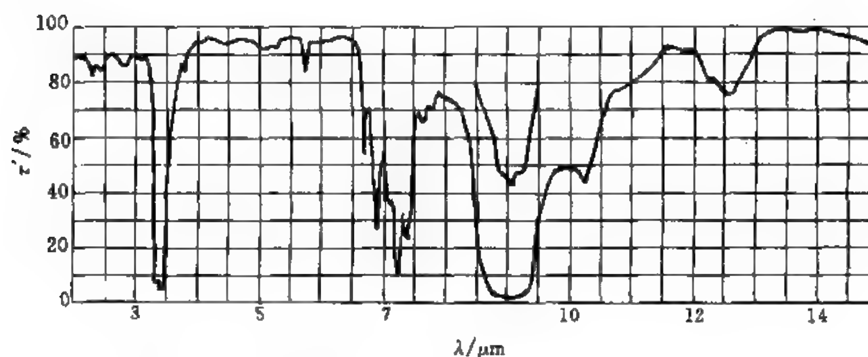


图 19-254 聚乙烯乙基醚的红外光谱(氯化钠晶片上薄膜)

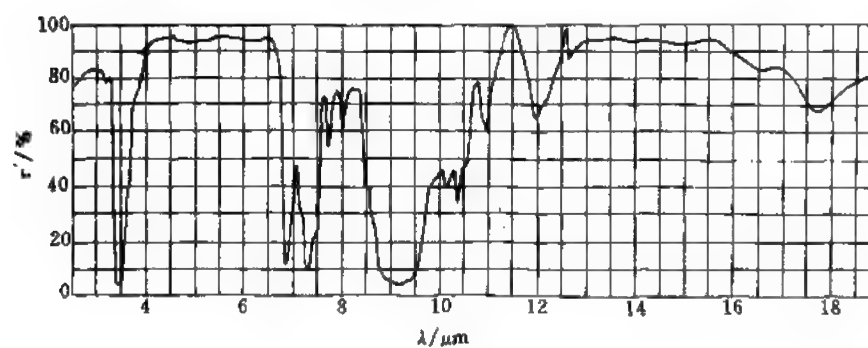


图 19-255 聚乙烯异丁基醚的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

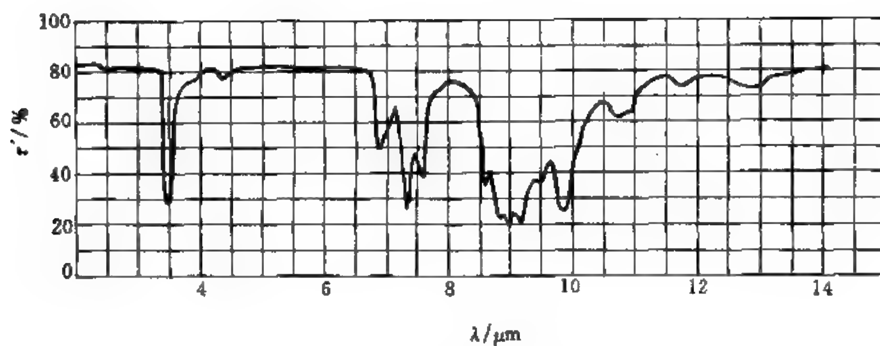


图 19-256　聚乙烯异丙基醚的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

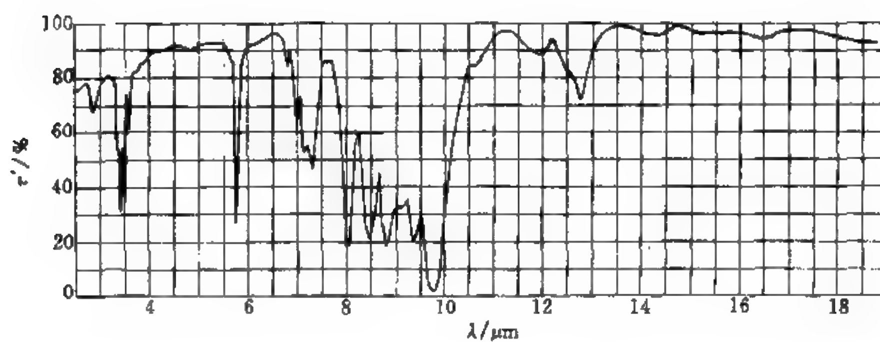


图 19-257　聚乙烯醇缩甲醛(含有残留乙酸乙烯酯)的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

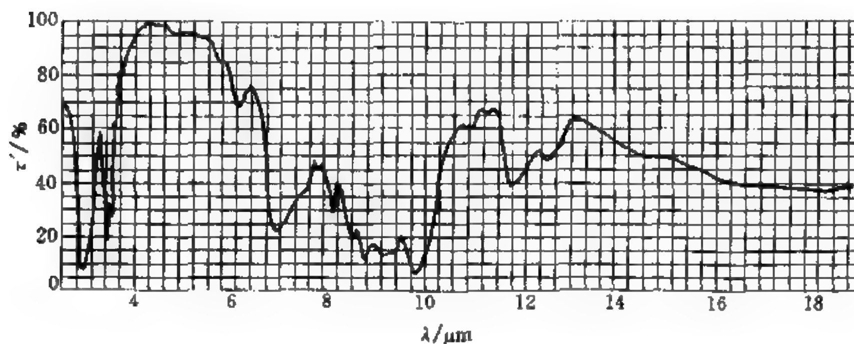


图 19-258　与甲醛反应交联的聚乙烯醇的红外光谱(溴化钾压片)

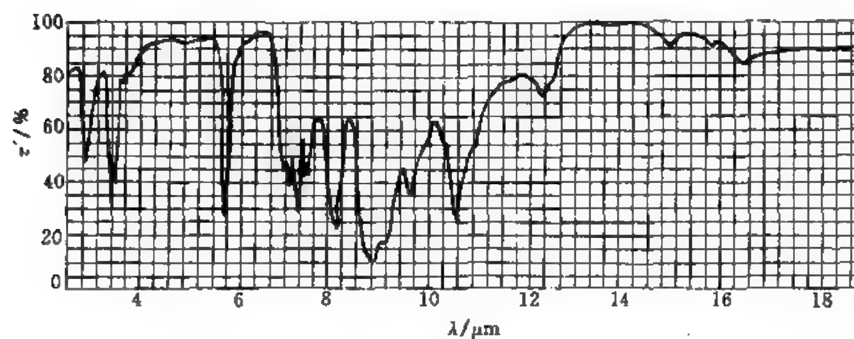


图 19-259　聚乙烯醇缩乙醛(含有残留醋酸乙烯酯)的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

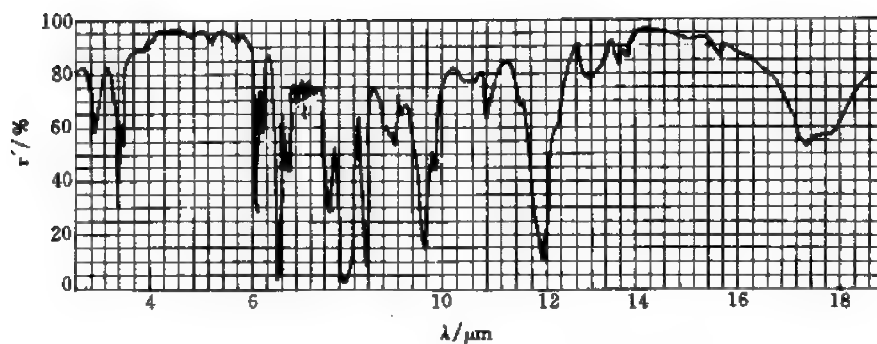


图 19-260　双酚 A 型环氧树脂的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

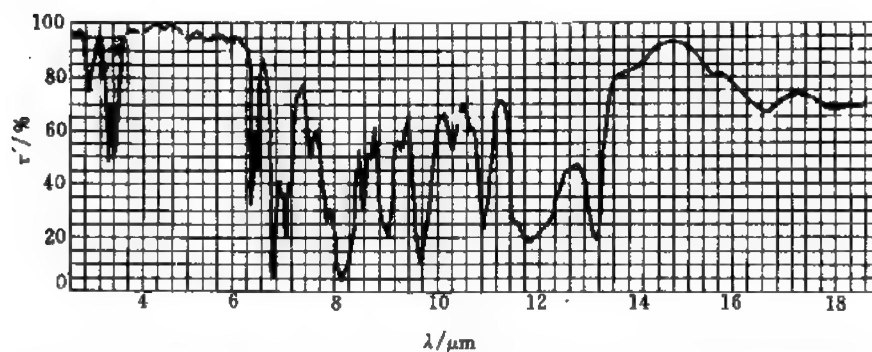


图 19-261　线性酚醛树脂与环氧氯丙烷反应产物的红外光谱(二氯甲烷溶液流延薄膜)

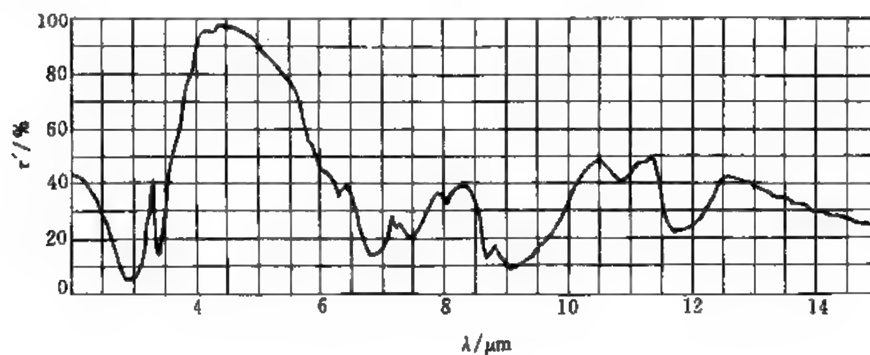


图 19-262　(水溶液在氯化银板上流延薄膜)聚乙烯醇的红外光谱

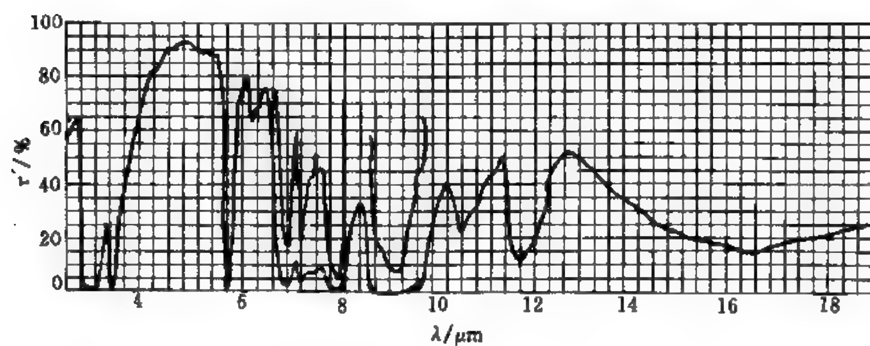


图 19-263　聚乙烯醇(含有残留乙酸乙烯酯)的红外光谱(薄膜)

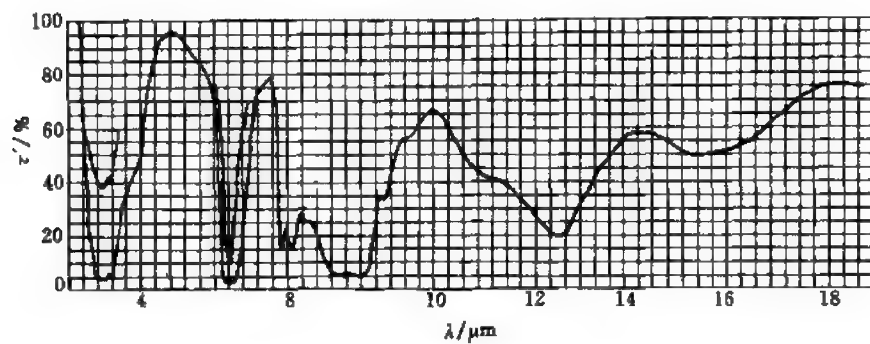


图 19-264　丙烯酸丙烯酸酯共聚物的红外光谱(溴化钾压片)

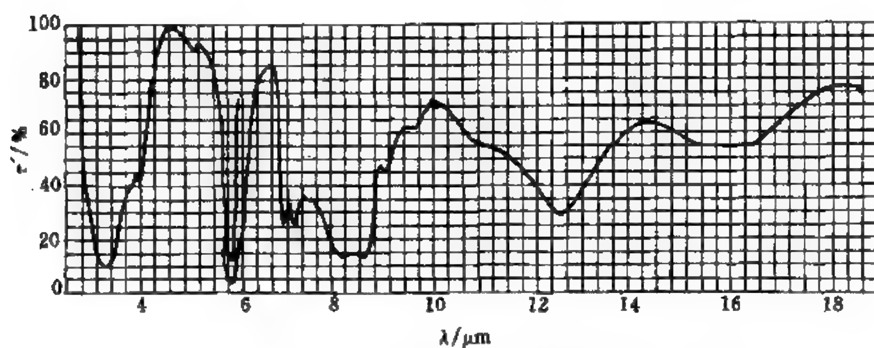


图 19-265　聚丙烯酸的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

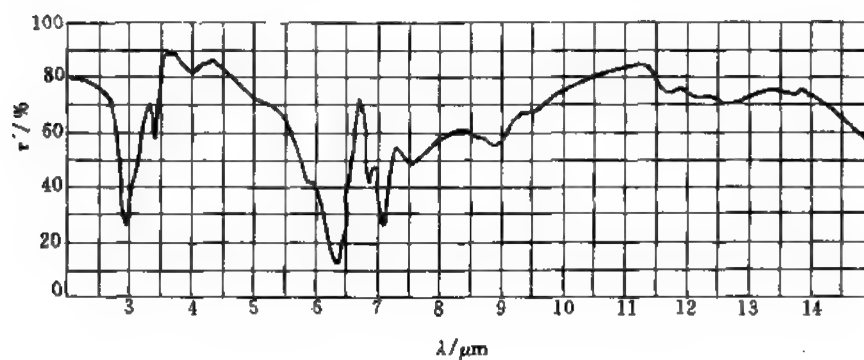


图 19-266　聚丙烯酸钠的红外光谱(溴化钾压片)

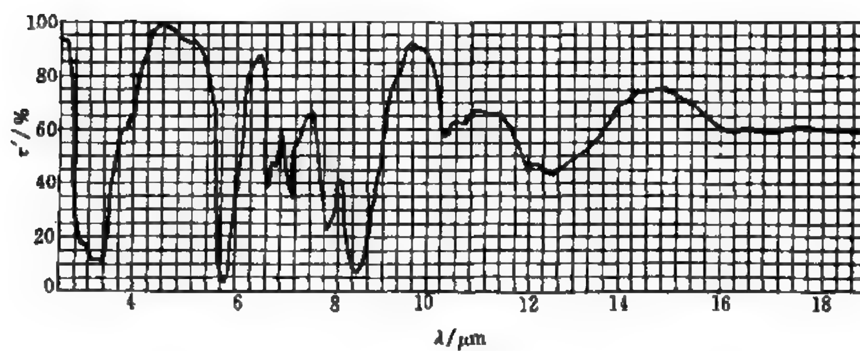


图 19-267　聚甲基丙烯酸的红外光谱(溴化钾压片)

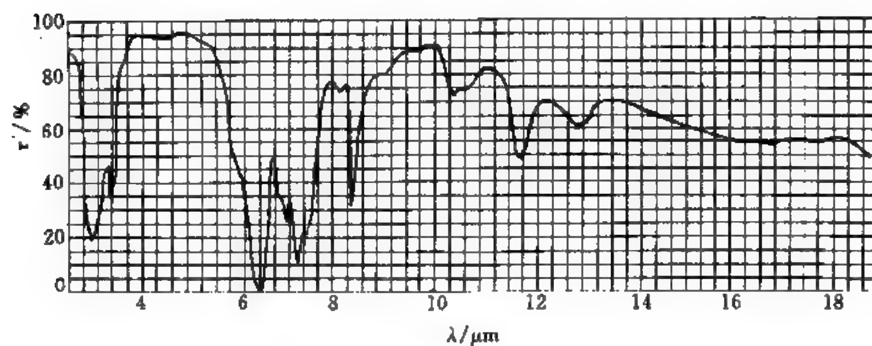


图 19-268　聚甲基丙烯酸钾的红外光谱(溴化钾压片)

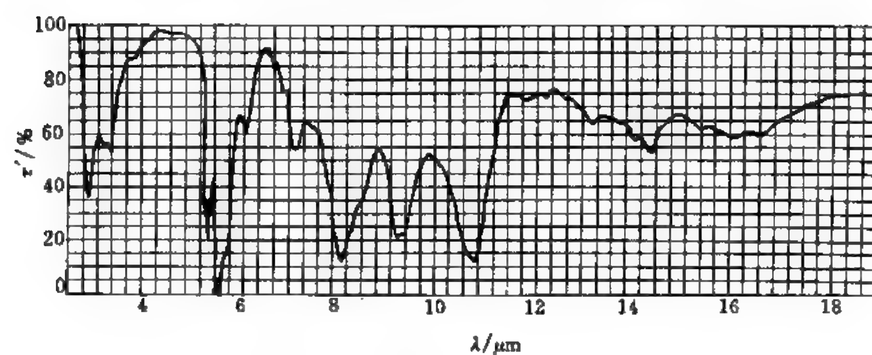


图 19-269　聚马来酸酐的红外光谱(溴化钾压片)

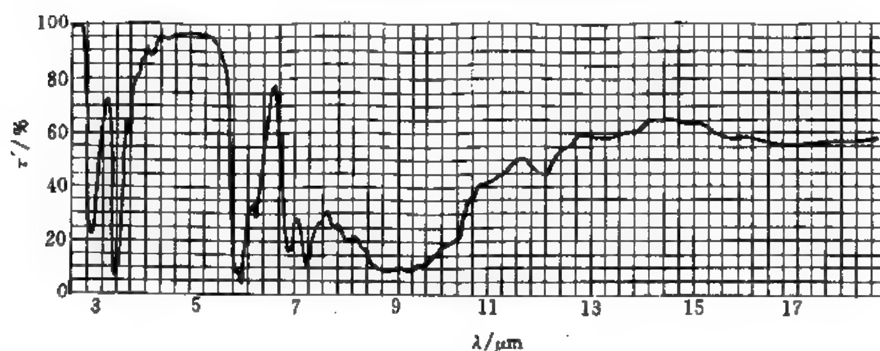


图 19-270　乙醛树脂的红外光谱(溴化钾压片)

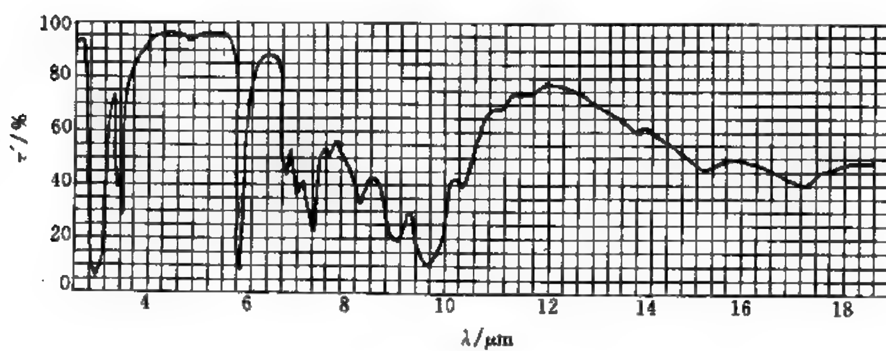


图 19-271　丙酮甲醛树脂的红外光谱(溴化钾晶片间薄膜)

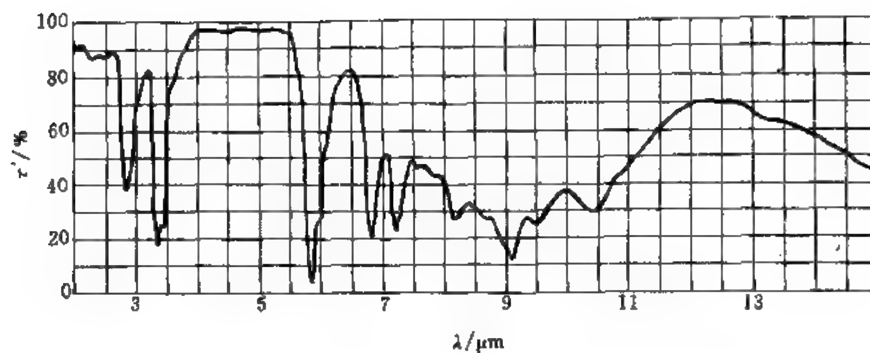


图 19-272　丁酮甲醛树脂的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

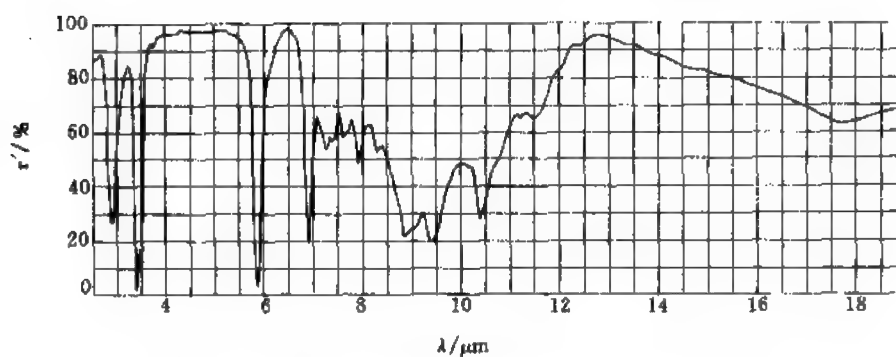


图 19-273　环己酮甲醛树脂的红外光谱(溴化钾压片)

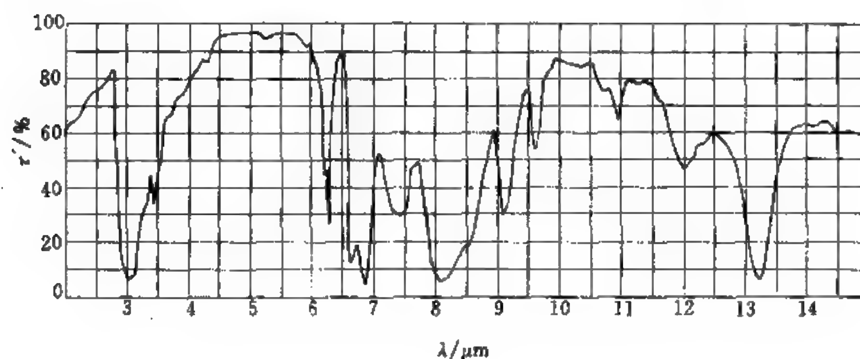


图 19-274　线性苯酚甲醛树脂(主要为 1,2,6-取代)红外光谱(溴化钾压片)

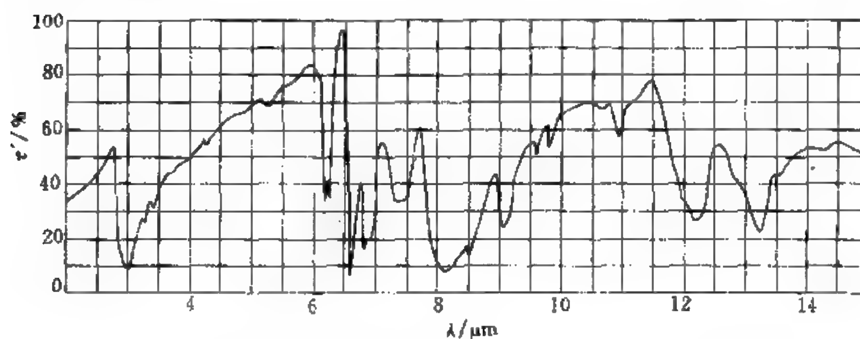


图 19-275　线性苯酚甲醛树脂(主要为 1,2,4-取代)的红外光谱(溴化钾压片)

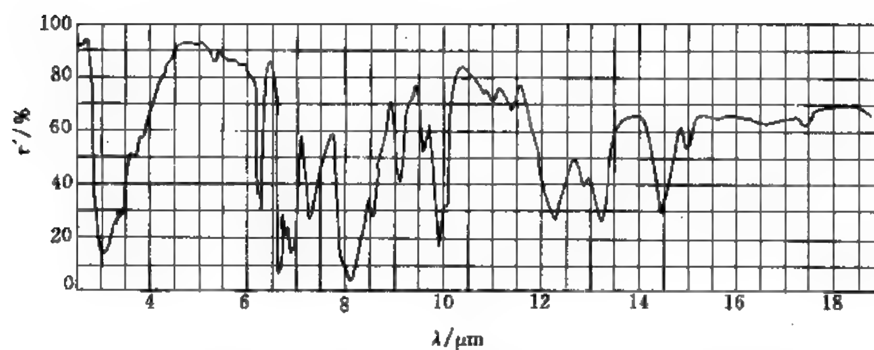


图 19-276 线性苯酚甲醛树脂与六亚甲基四胺混合物的红外光谱(溴化钾压片)

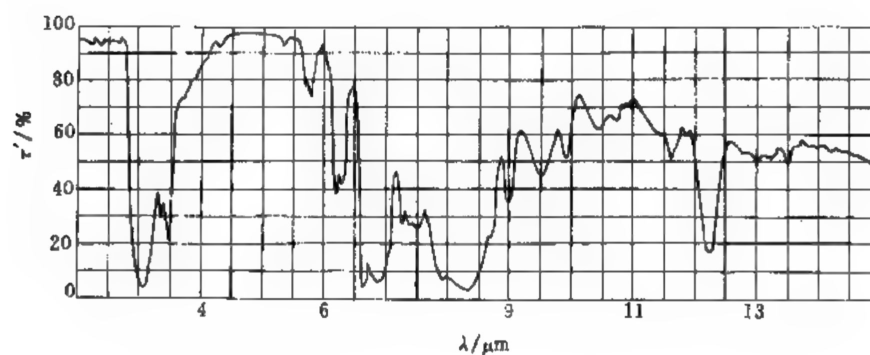


图 19-277 线性甲酚甲醛树脂的红外光谱(乙醇溶液流延薄膜)

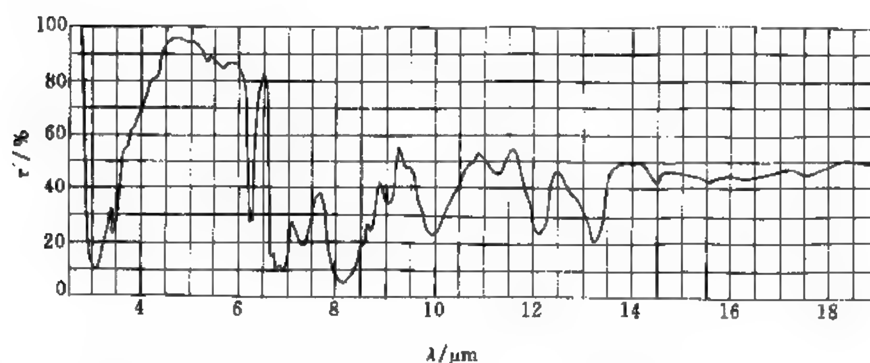


图 19-278 未改性的、可固化的苯酚甲醛缩合产物的红外光谱(溴化钾片上薄膜,90℃干燥)

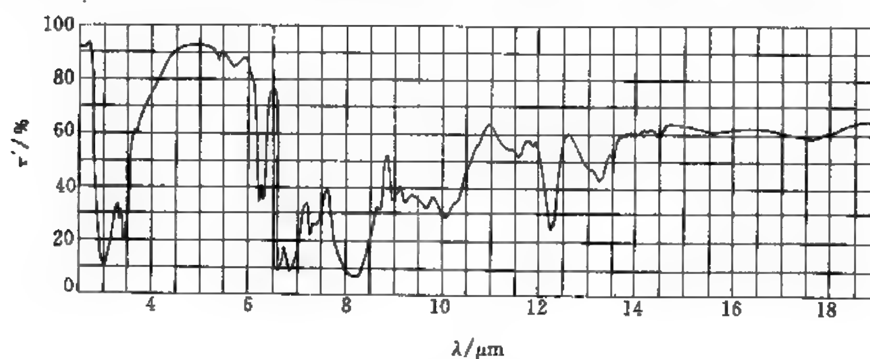


图 19-279 甲阶甲酚甲醛树脂的红外光谱(溴化钾片上流延薄膜)

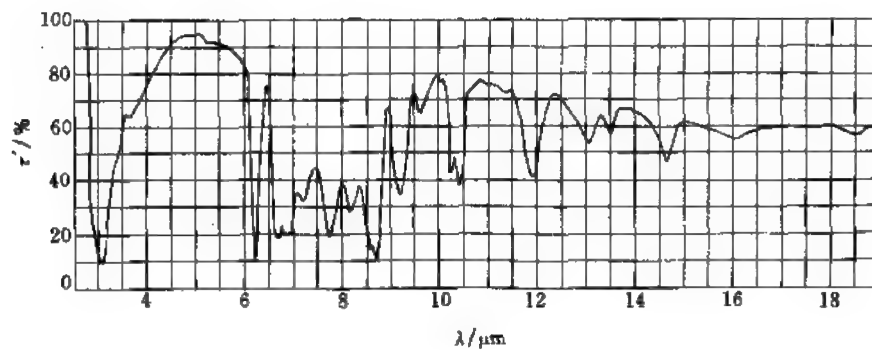


图 19-280　间苯二酚甲醛树脂的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

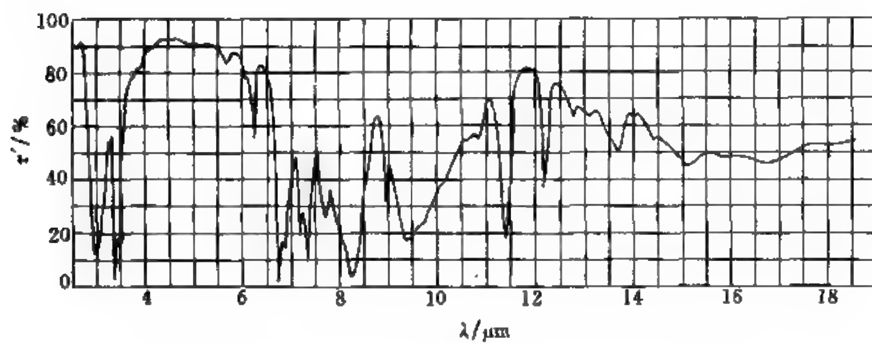


图 19-281　叔丁基酚甲醛树脂的红外光谱(溴化钾压片)

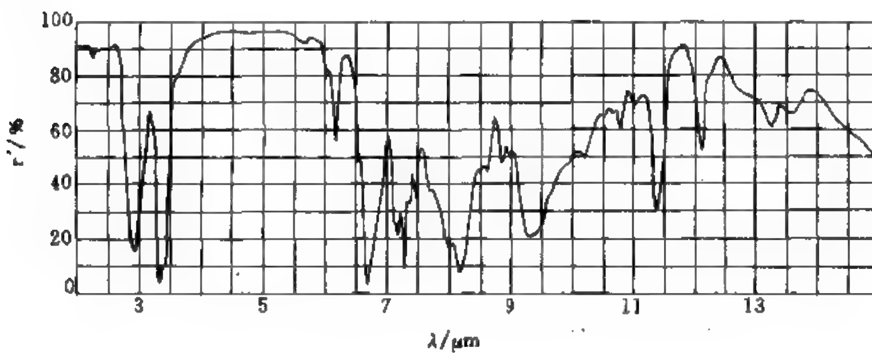


图 19-282　叔辛基酚甲醛树脂的红外光谱(溴化钾压片)

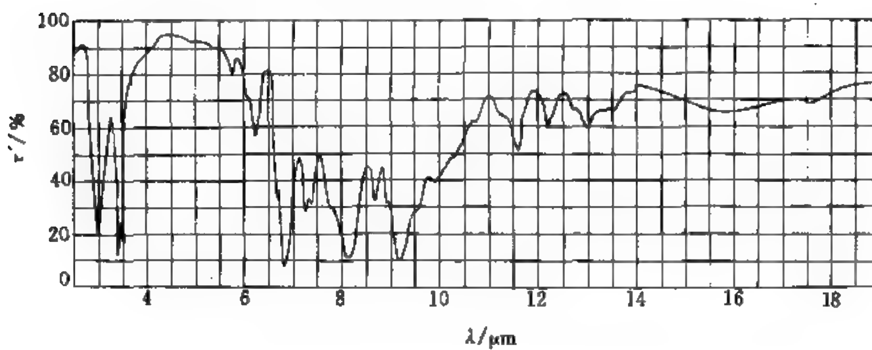


图 19-283　丁基醚化甲阶酚醛树脂的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

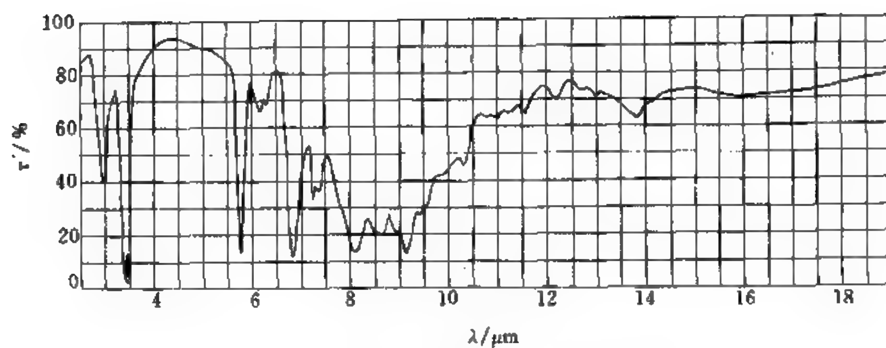


图 19-284　油改性的酚醛树脂的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

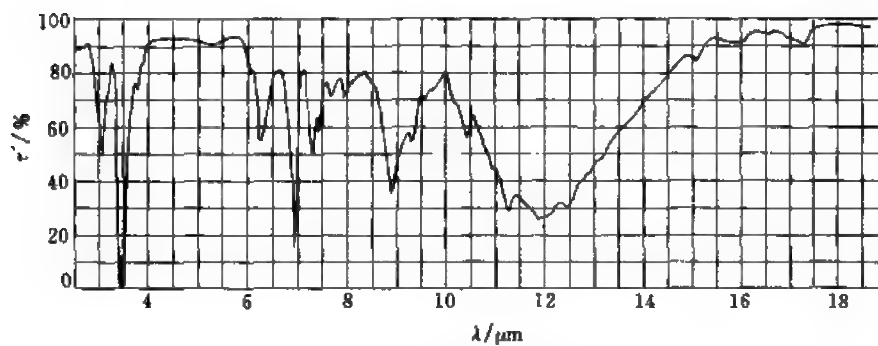


图 19-285　脂环族聚胺混合物的红外光谱(溴化钾片间薄膜)

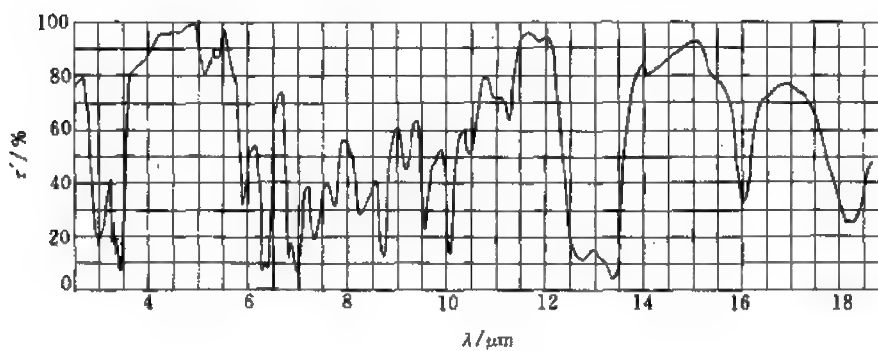


图 19-286　聚乙烯基吡啶的红外光谱

(丙酮溶液流延薄膜，5.9μm 吸收带来源于残留的丙酮)

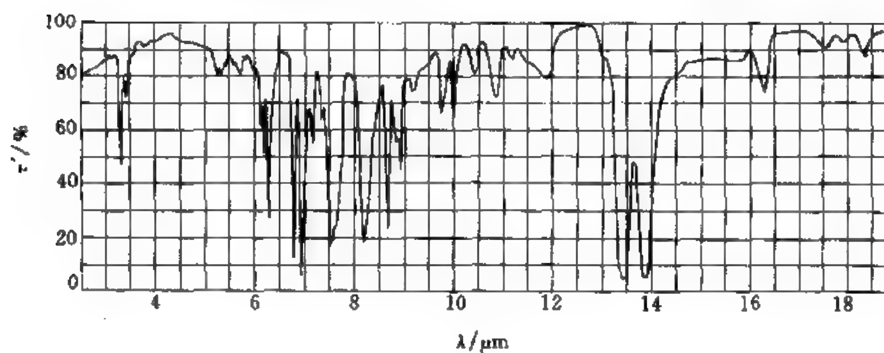


图 19-287　聚乙烯基咔唑的红外光谱(二氯甲烷溶液流延薄膜)

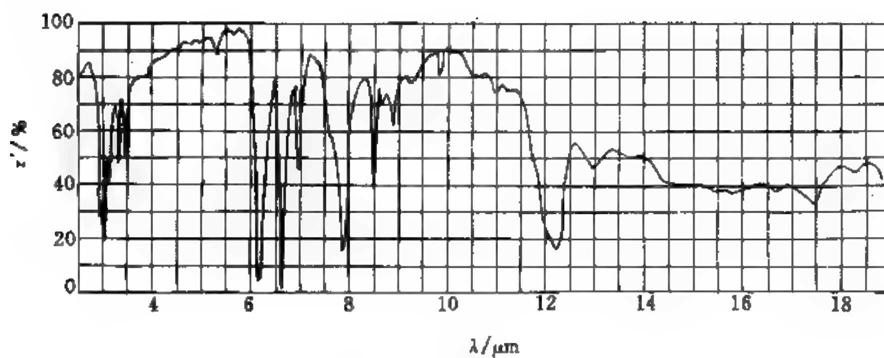


图 19-288　苯胺甲醛树脂(可熔的)红外光谱(溴化钾压片)

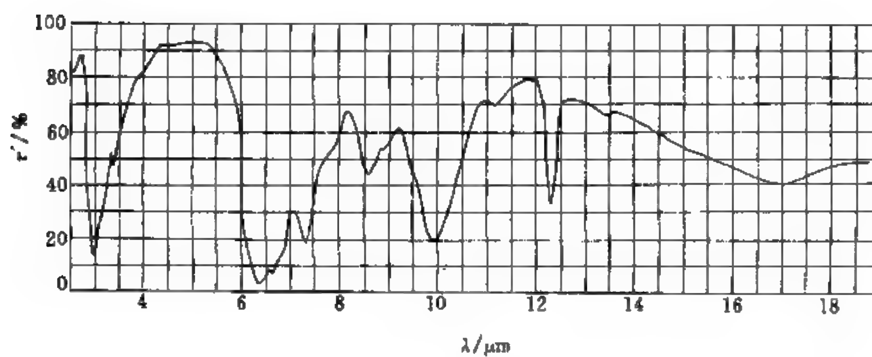


图 19-289　三聚氰胺甲醛树脂的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

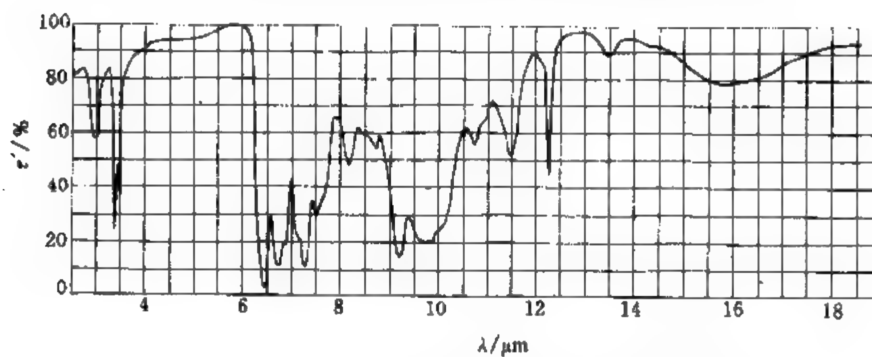


图 19-290　丁氧基化三聚氰胺甲醛树脂(丙酮溶液流延薄膜)

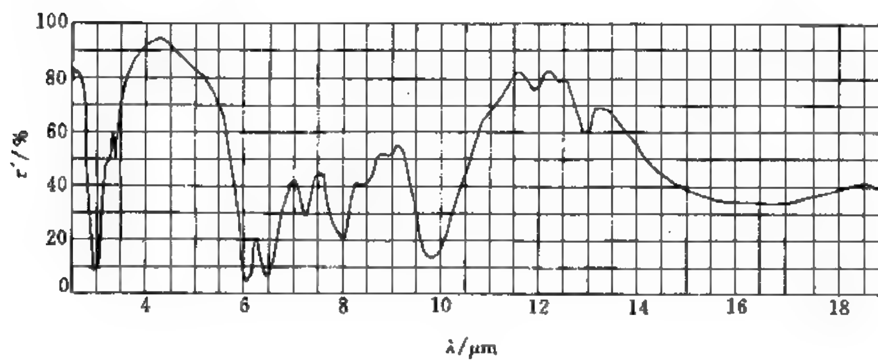


图 19-291　脲甲醛树脂的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

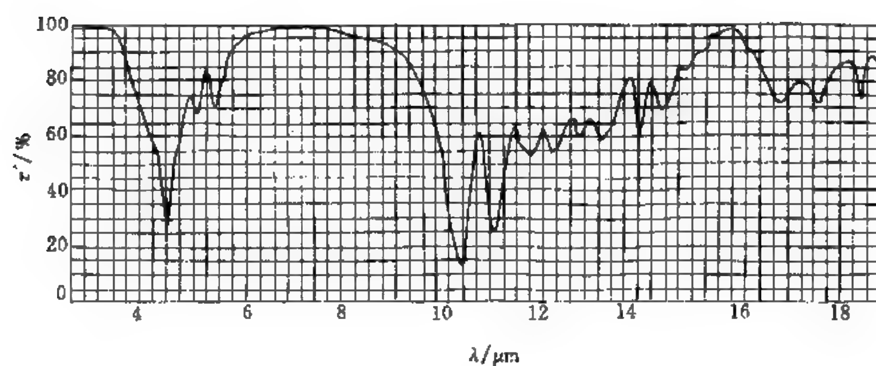


图 19-292 3-聚酰胺(α型)的红外光谱(甲酸溶液流延薄膜)

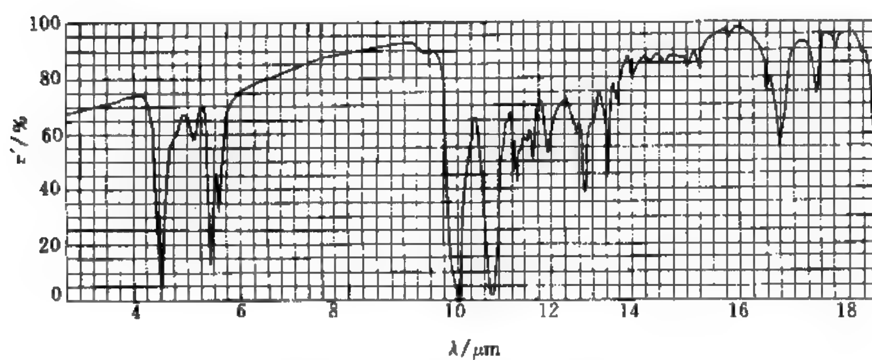


图 19-293 6-聚酰胺(β型)的红外光谱(甲酸溶液流延薄膜)

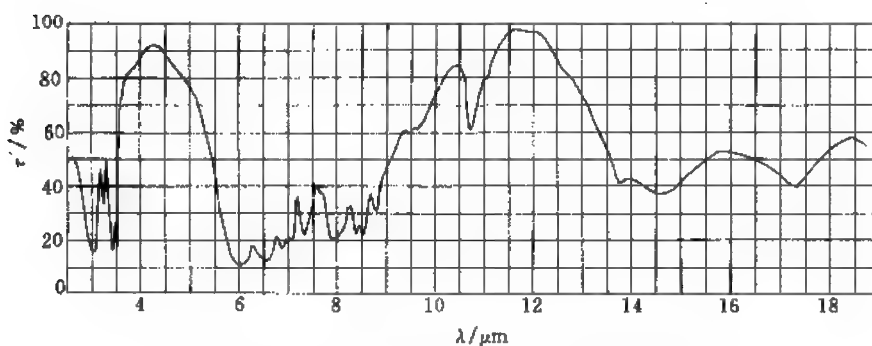


图 19-294 聚酰胺-66和聚酰胺-6(9∶1)共聚物的红外光谱

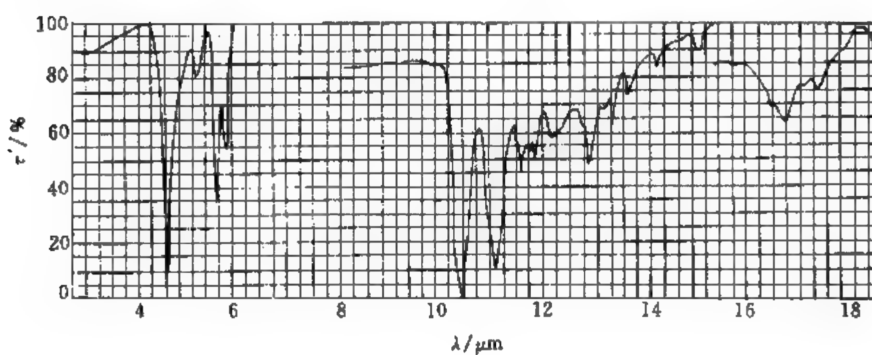


图 19-295 聚酰胺-5,7(α/β型)(结晶的)红外光谱(热压并退火)

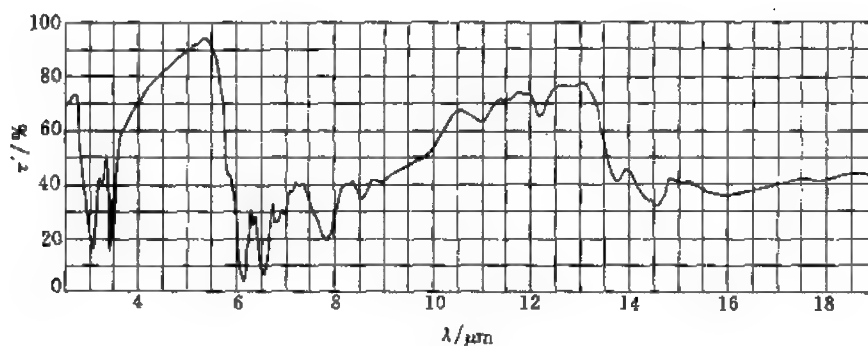


图 19-296　6,i-聚酰胺的红外光谱(KBr 压片)

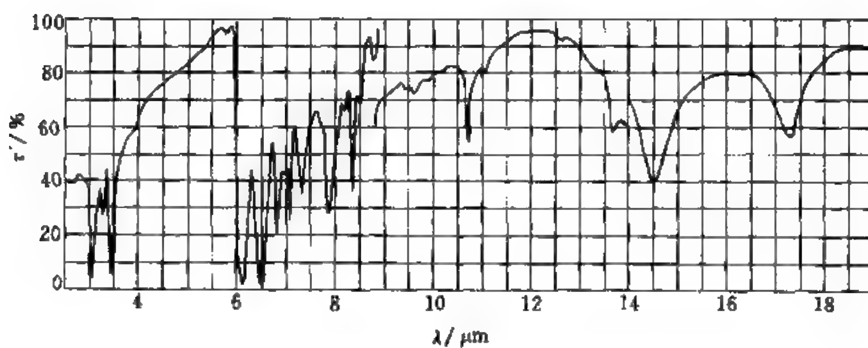


图 19-297　6,6-聚酰胺的红外光谱(甲酸溶液流延薄膜)

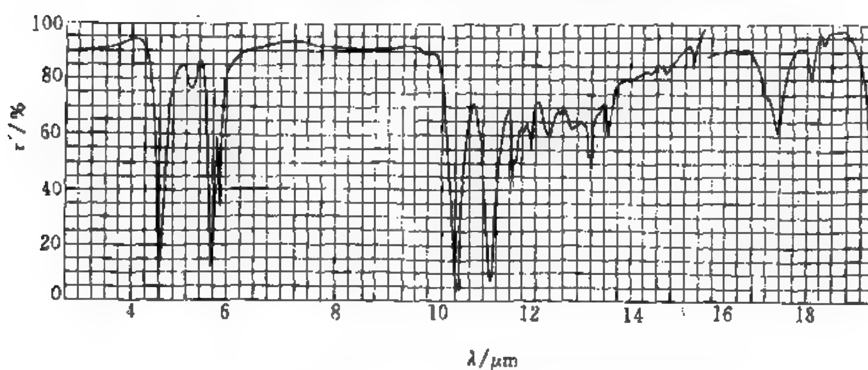


图 19-298　6,10-聚酰胺的红外光谱(甲酸溶液流延薄膜)

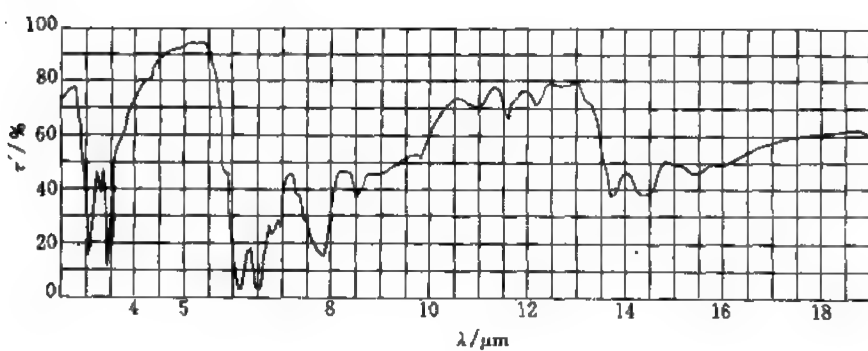


图 19-299　6,it-聚酰胺的红外光谱(溴化钾压片)

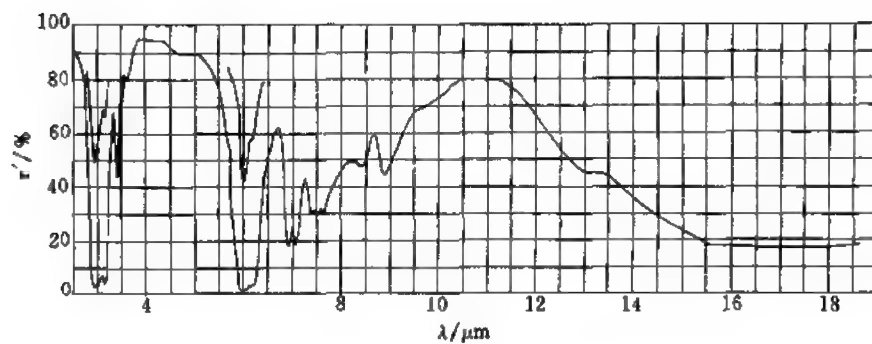


图 19-300　聚丙烯酰胺的红外光谱(甲酸溶液流延薄膜)

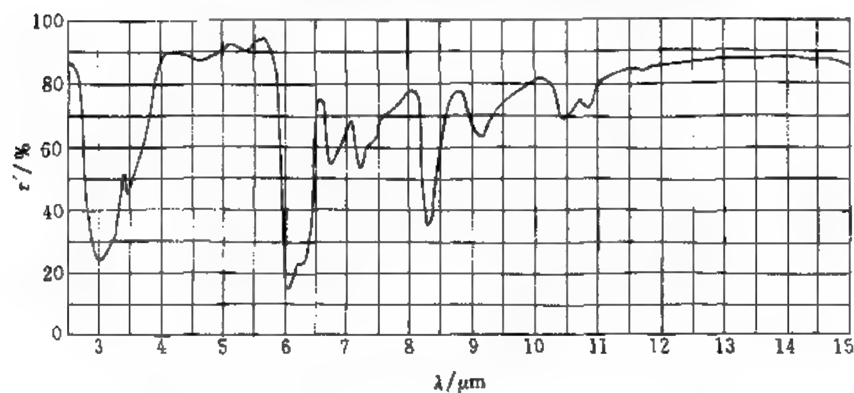


图 19-301　聚甲基丙烯酰胺的红外光谱(溴化钾压片)

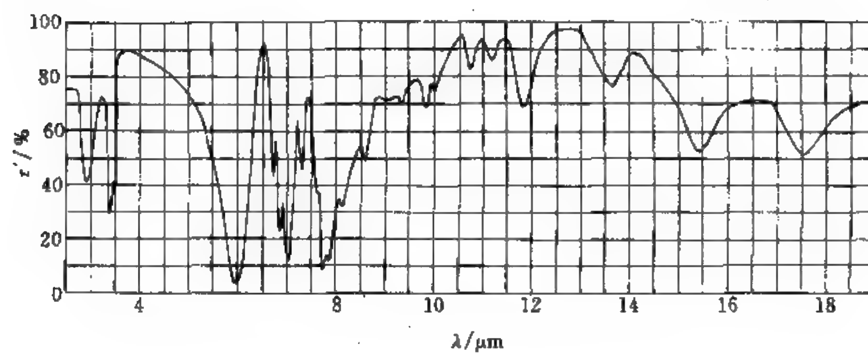


图 19-302　聚乙烯吡咯烷酮的红外光谱(溴化钾压片)

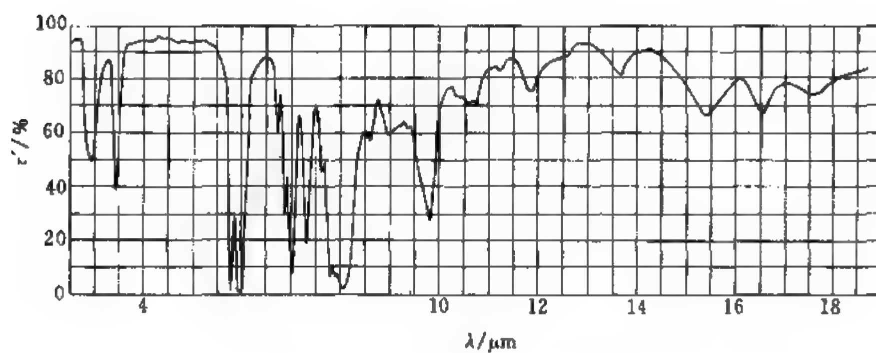


图 19-303　乙烯吡咯烷酮乙酸乙烯酯共聚物的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

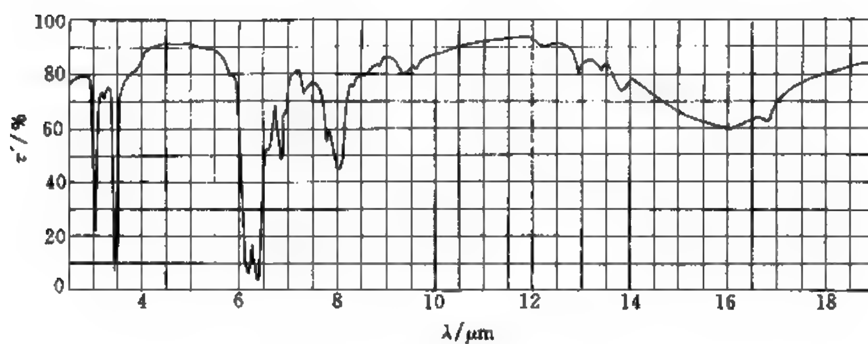


图 19-304　聚脲-9[—(CH$_2$)$_9$NHCONH—]$_n$ 的红外光谱(二氯乙酸溶液流延薄膜)

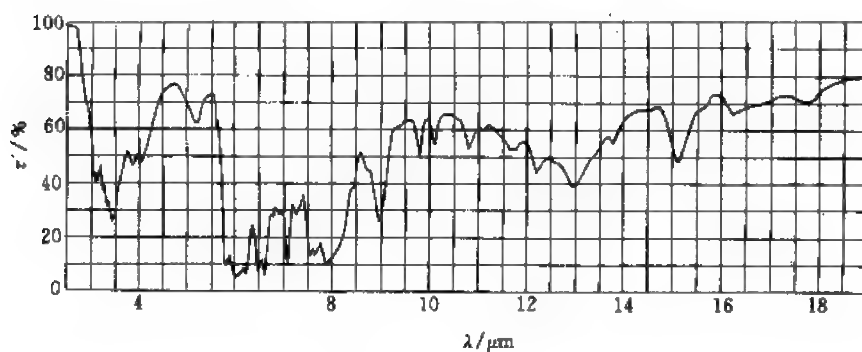


图 19-305　均苯四甲酸二酐与 4,4′-二氨基二苯甲烷制备的聚酰胺酸的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

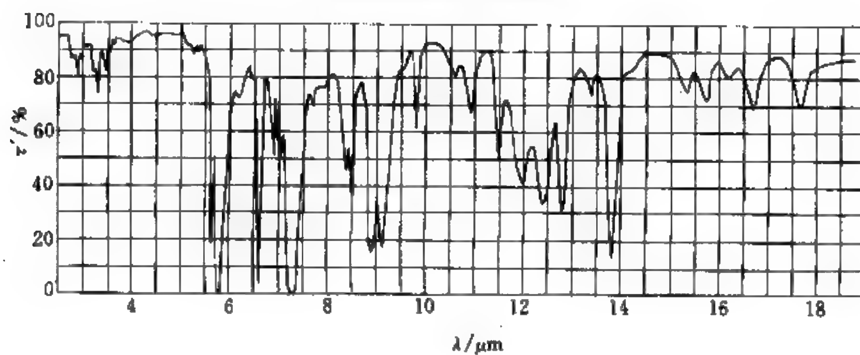


图 19-306　均苯四甲酸二酐与 4,4-二氨基二苯甲烷制备的聚酰亚胺的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜,250℃焙烤过)

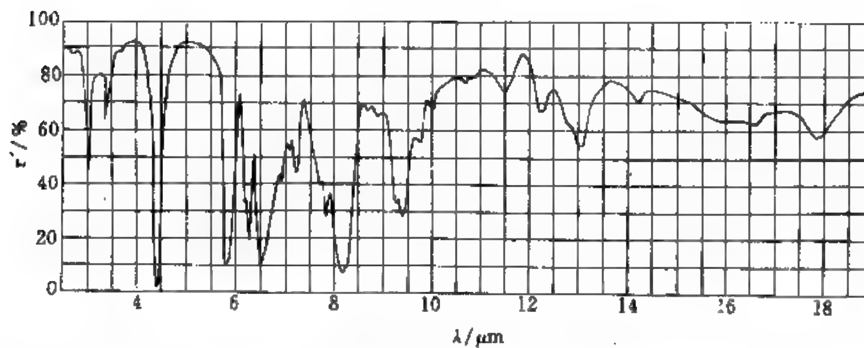


图 19-307　甲苯二异氰酸酯与三羟苯基丙烷制备的三异氰酸酯-氨基甲酸酯的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

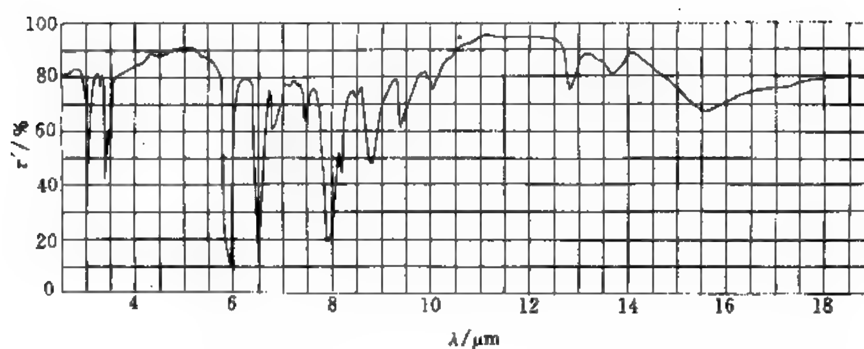


图 19-308　六亚甲基二异氰酸酯与1,4-丁二醇制备的聚氨基甲酸酯红外光谱（甲酸溶液流延薄膜）

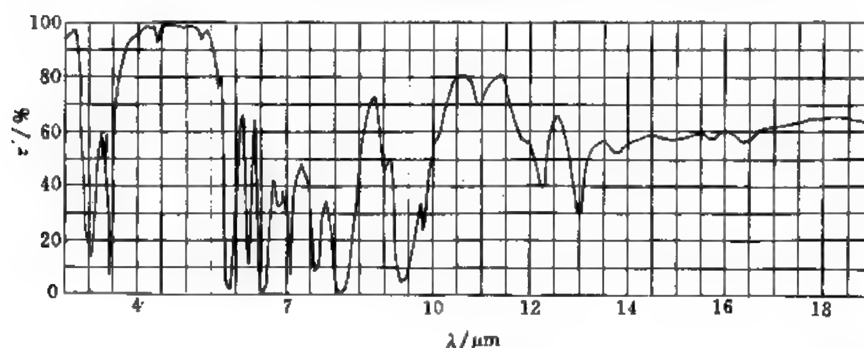


图 19-309　4,4′-二苯基甲烷二异氰酸酯与1,6-己二醇制备的聚氨基甲酸酯的红外光谱（溴化钾晶片上薄膜）

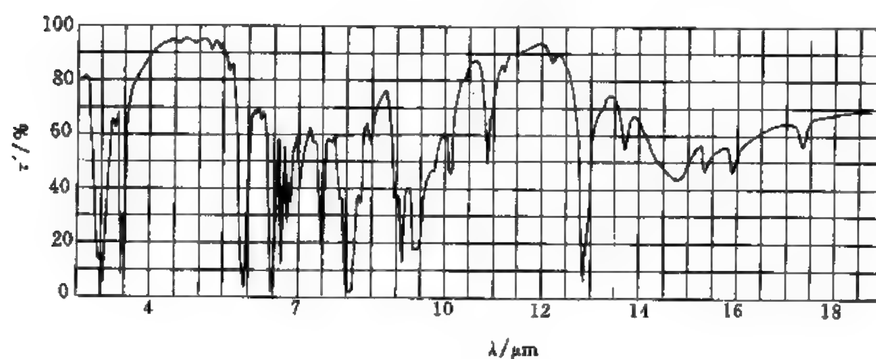


图 19-310　1,5-萘二异氰酸酯与乙二醇制备的聚氨基甲酸酯的红外光谱（溴化钾压片）

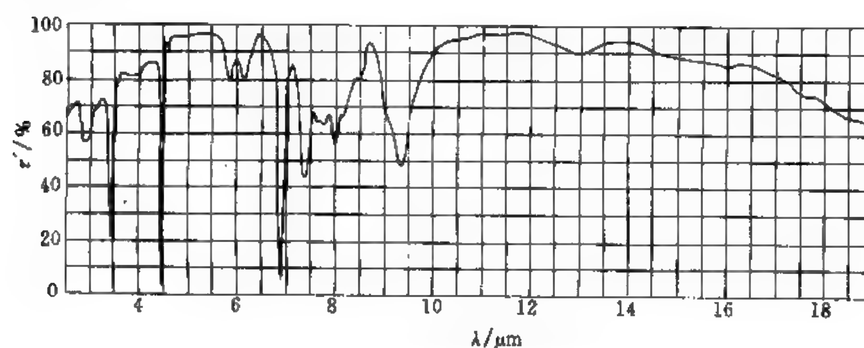


图 19-311　聚丙烯腈的红外光谱（溴化钾压片）

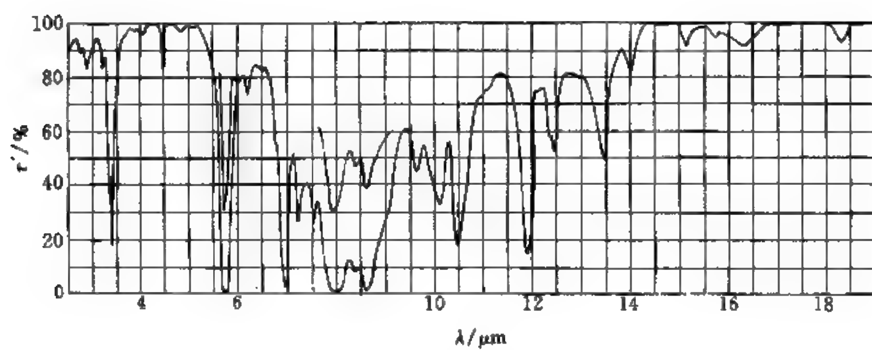


图 19-312 聚氰基丙烯酸酯的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

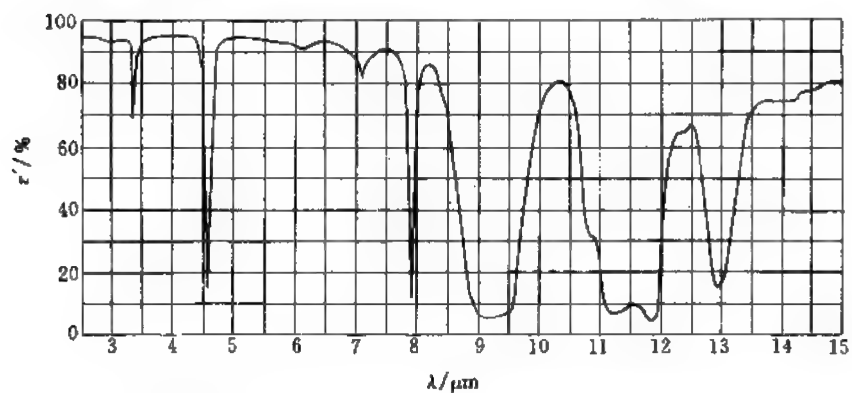


图 19-313 甲基氢硅油的红外光谱(两块盐片间液膜)

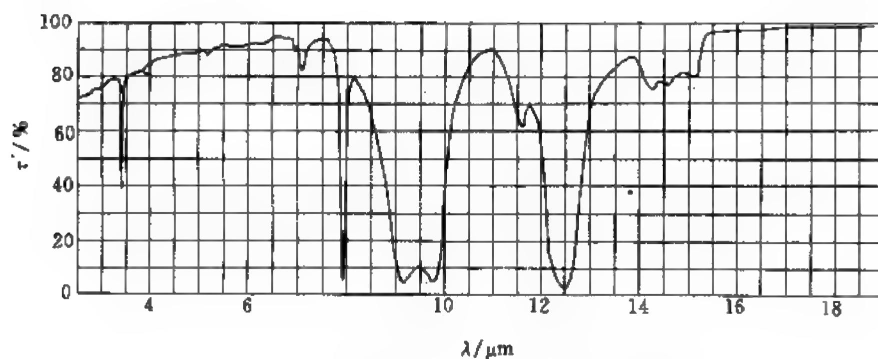


图 19-314 甲基硅油的红外光谱(两块盐片间液膜)

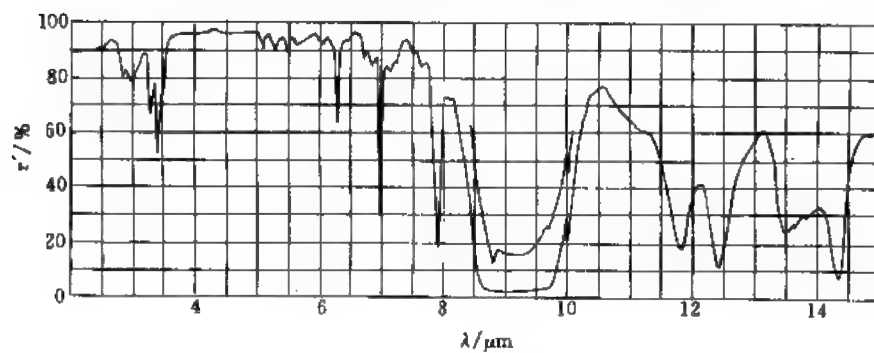


图 19-315 聚二甲基二苯基硅氧烷的红外光谱(液体)

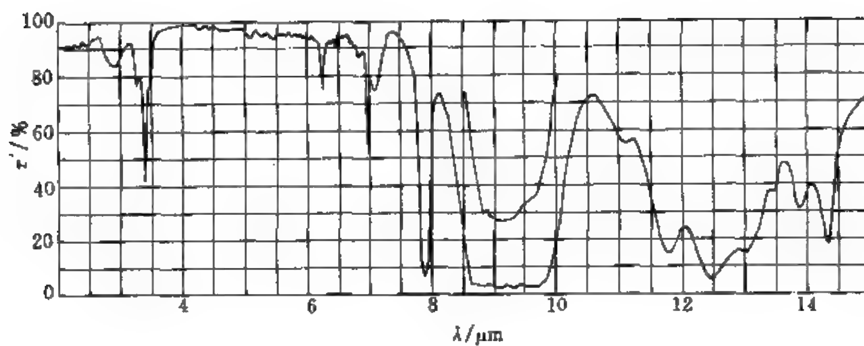


图 19-316 聚甲基苯基硅氧烷的红外光谱(液体)

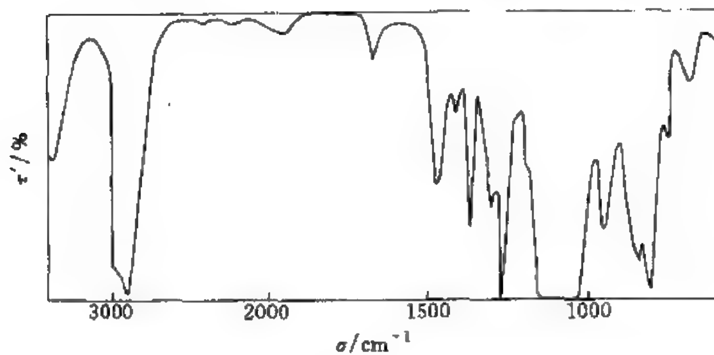


图 19-317 二甲基硅氧烷二元醇共聚物的红外光谱(液体)

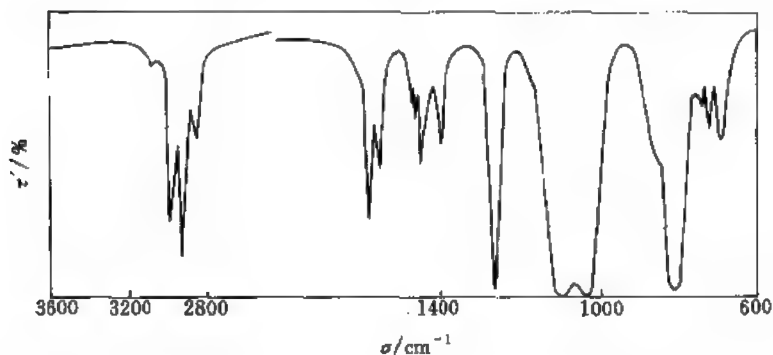


图 19-318 硬脂酸锂填充的[$Me_2SiO(PhMeSiO)(Me_3SiO)$]共聚物的红外光谱

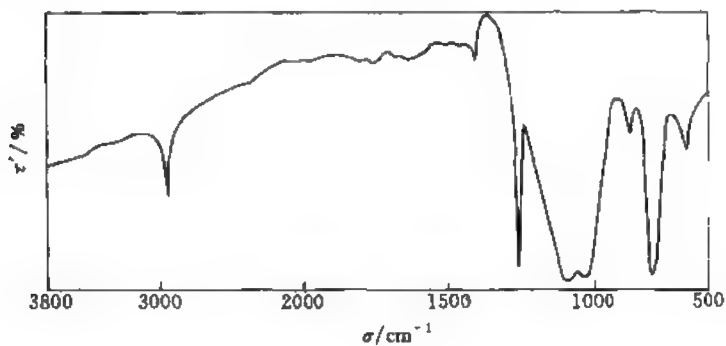


图 19-319 聚二甲基硅氧烷树脂的红外光谱

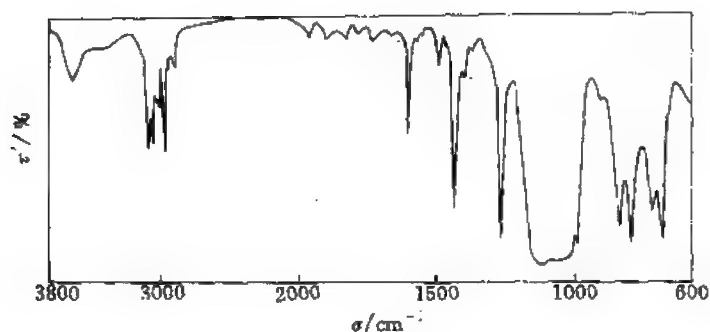


图 19-320 聚二甲基二苯基硅氧烷树脂的红外光谱

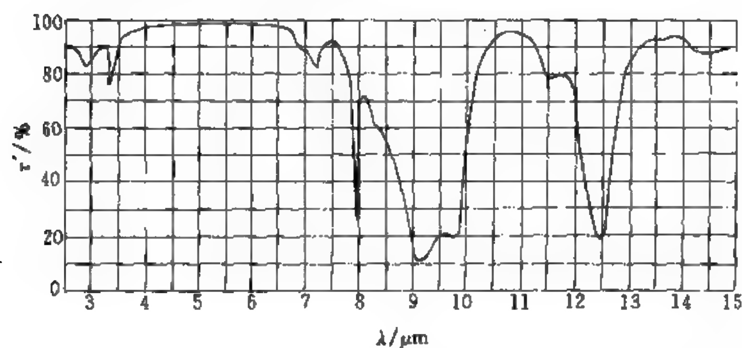


图 19-321 甲基硅橡胶的红外光谱(溴化钾压片,液氮下研磨)

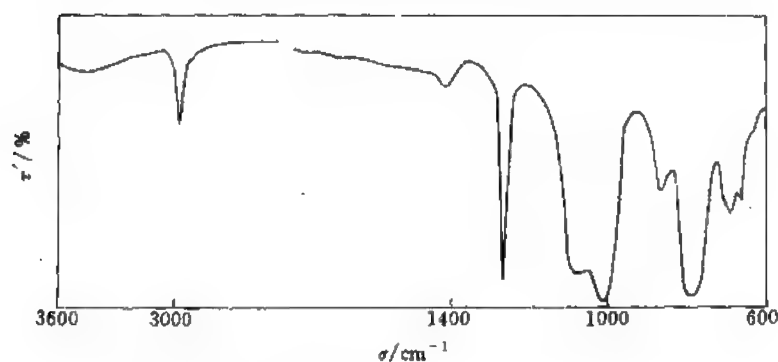


图 19-322 聚二甲基硅氧烷橡胶(已硫化的)内反射红外光谱

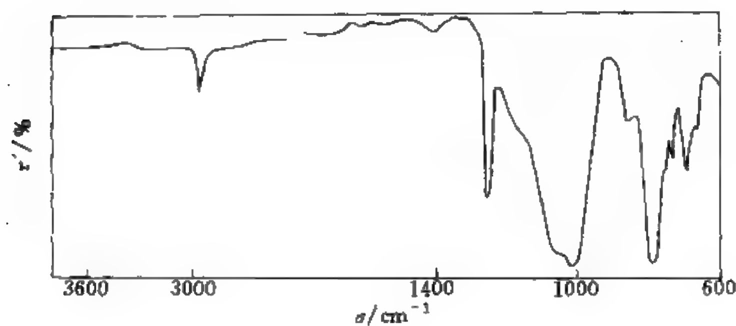


图 19-323 含有 Me_2SiO 和 PhMeSiO 单元的硅橡胶(已硫化)的内反射红外光谱

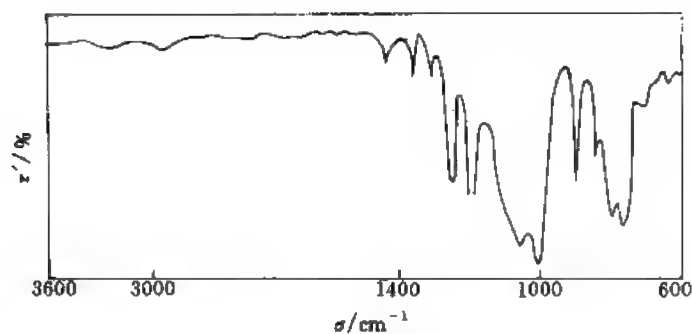


图 19-324 含有 $F_3CCH_2CH_2(CH_3)SiO$ 单元的硅橡胶(已硫化)的内反射红外光谱

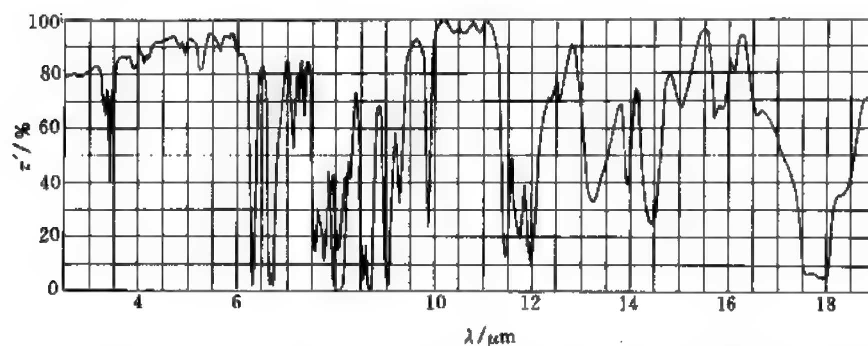


图 19-325 双酚 A 与 4,4'-二羟基二苯砜制备的芳香族聚砜的红外光谱(氯仿溶液流延薄膜)

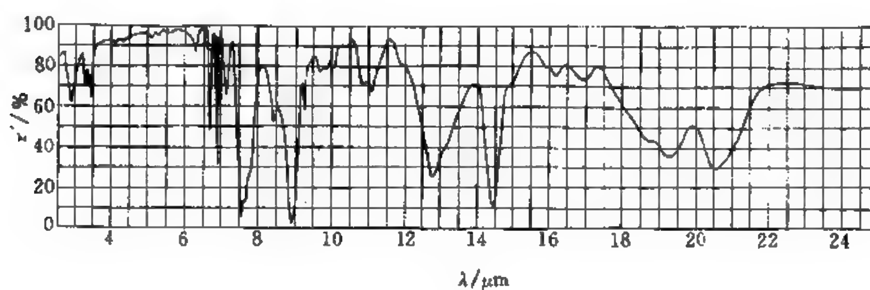


图 19-326 苯乙烯-SO_2 共聚物的红外光谱(溴化钾压片)

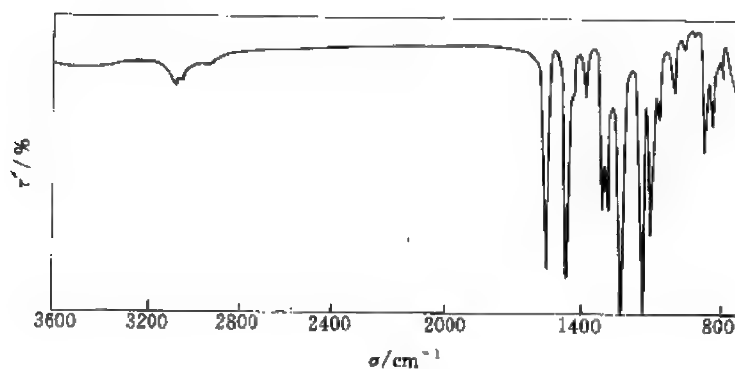


图 19-327 聚二苯醚砜的红外光谱

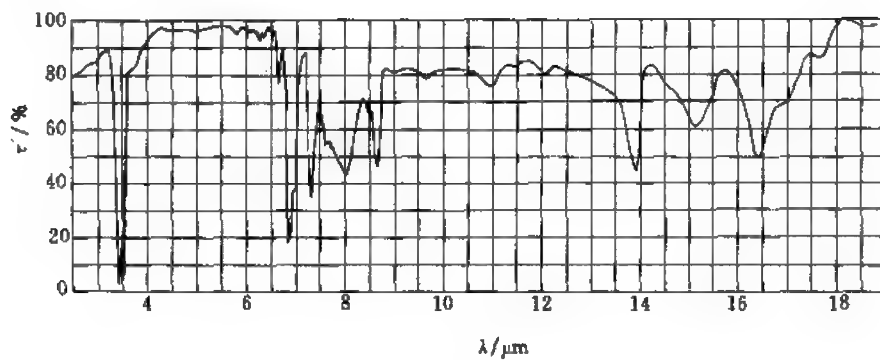


图 19-328 氯磺化聚乙烯的红外光谱(氯仿溶液流延薄膜)

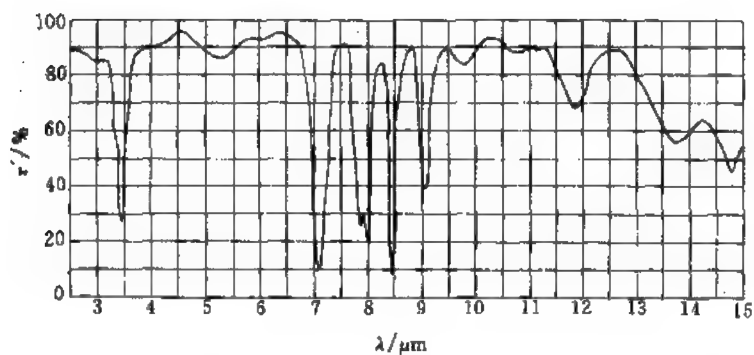


图 19-329 聚亚乙基四硫化物的红外光谱(氯化银板间热压薄膜)

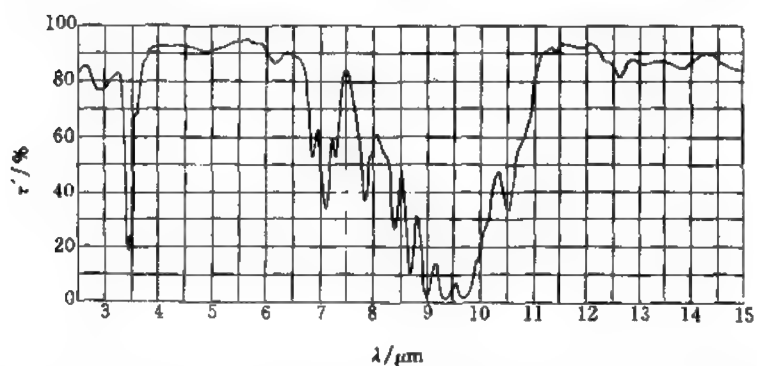


图 19-330 二氯乙基缩甲醛与多硫化钠制备的聚硫橡胶的红外光谱(氯化银板间热压)

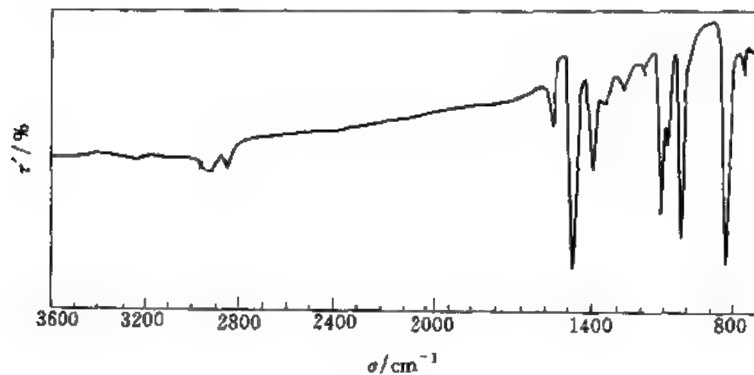


图 19-331 聚苯硫醚的红外光谱

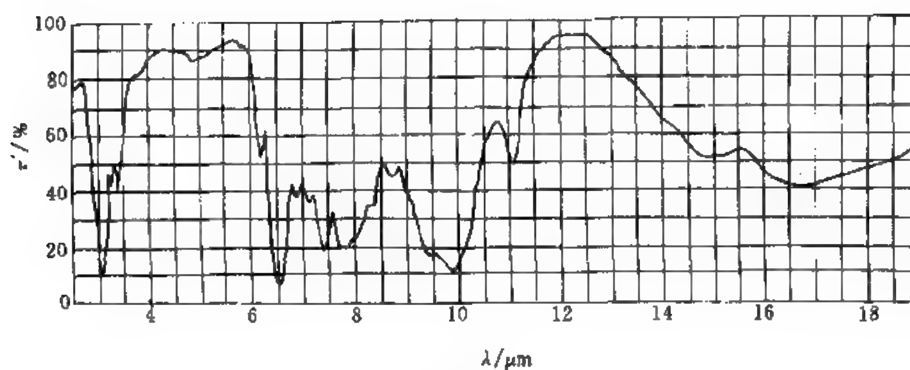


图 19-332 硫脲甲醛树脂的红外光谱(溴化钾晶片上薄膜)

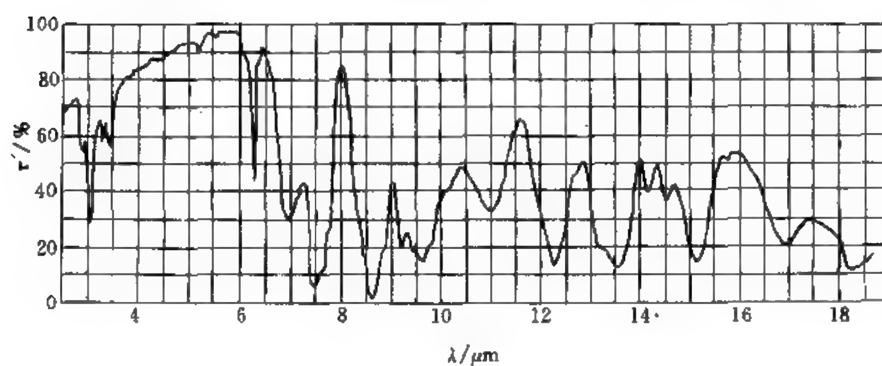


图 19-333 对甲苯磺酰胺甲醛树脂的红外光谱(溴化钾压片)

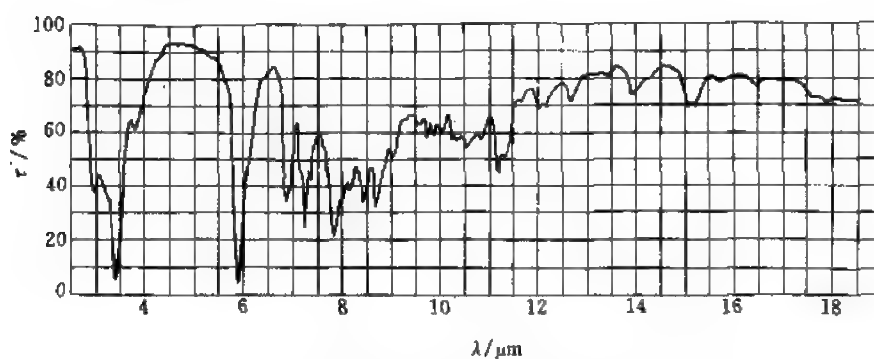


图 19-334 松香酸(重结晶)的红外光谱(溴化钾压片)

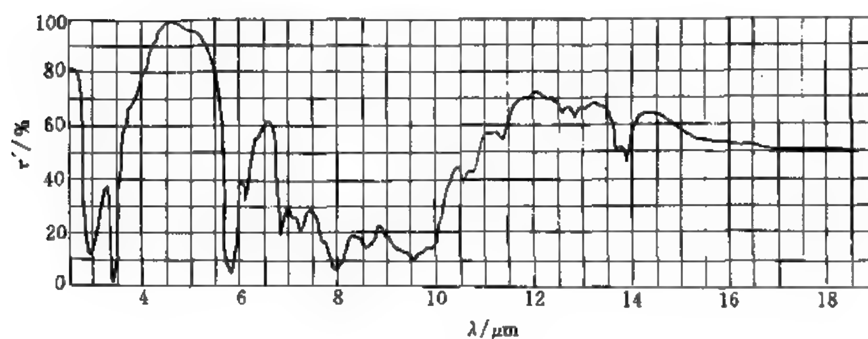


图 19-335 虫胶的红外光谱(溴化钾压片)

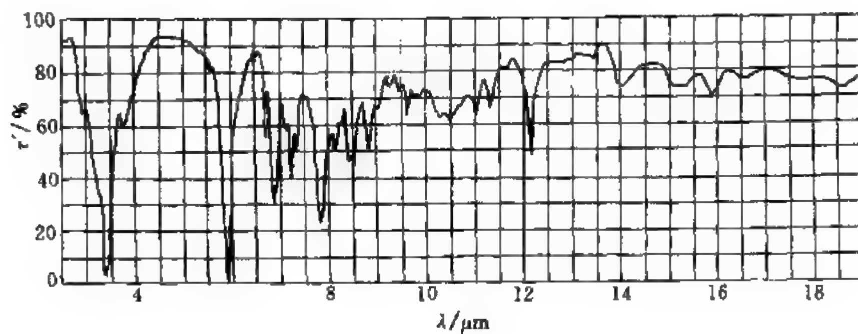


图 19-336 皎化松香的红外光谱(溴化钾压片)

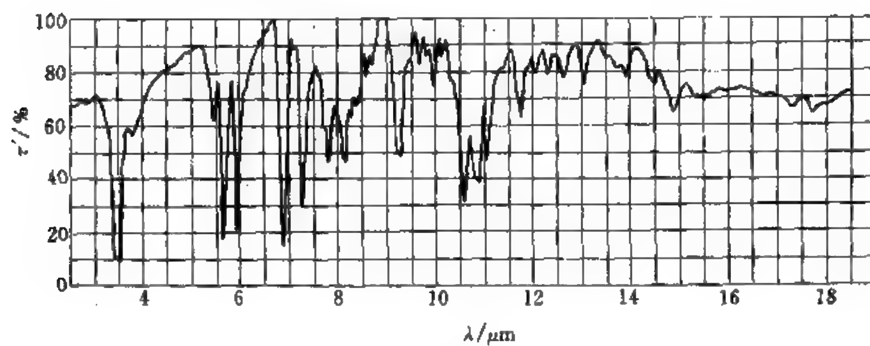


图 19-337 马来酸酐与松香酸加成物的红外光谱(石蜡油糊)

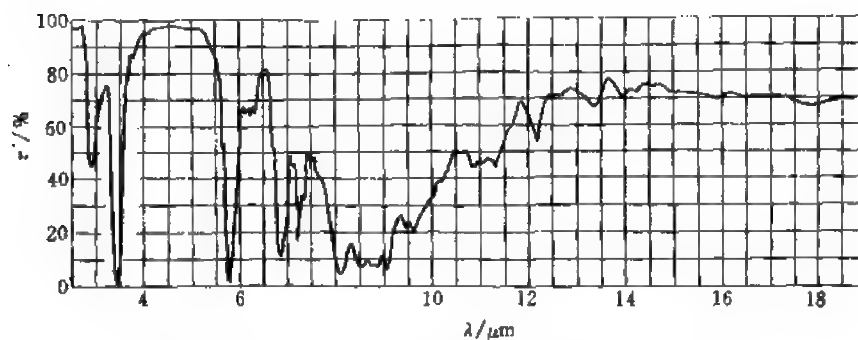


图 19-338 松香改性的酚类树脂的红外光谱(溴化钾压片)

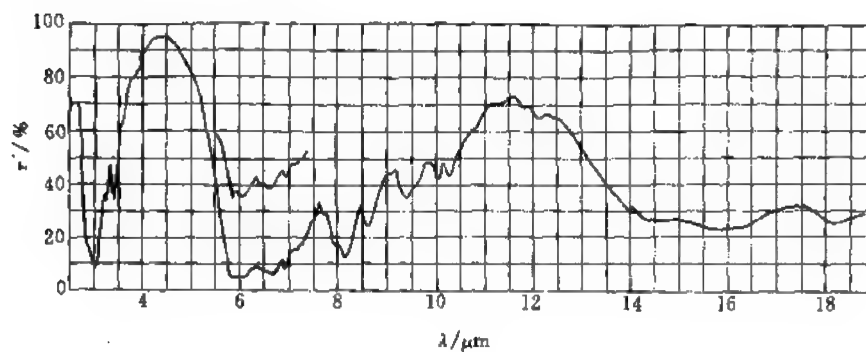


图 19-339 丝(多肽)的红外光谱(溴化钾压片)

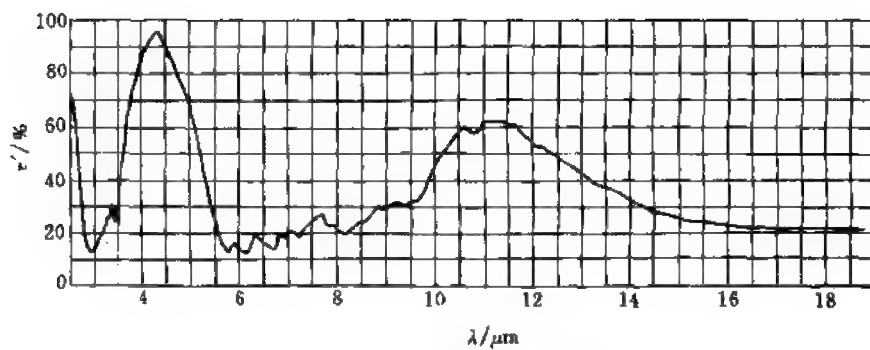


图 19-340 羊毛的红外光谱(钾溴后化片)

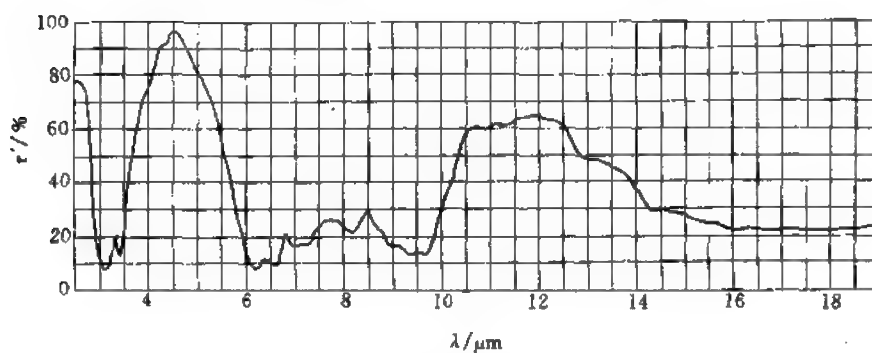


图 19-341 酪朊的红外光谱(溴化钾压片)

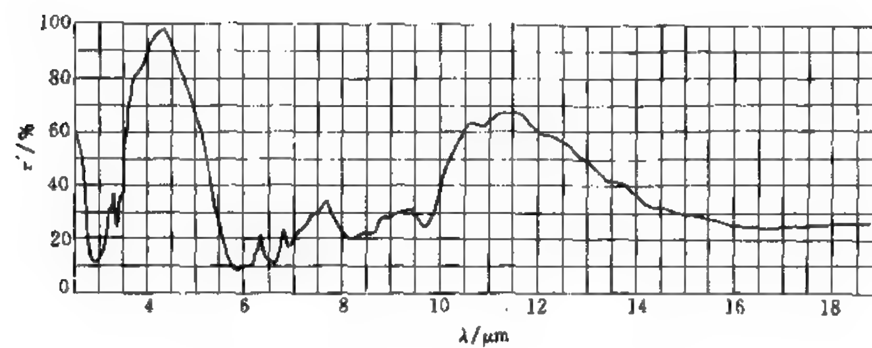


图 19-342 交联酪朊的红外光谱(溴化钾压片)

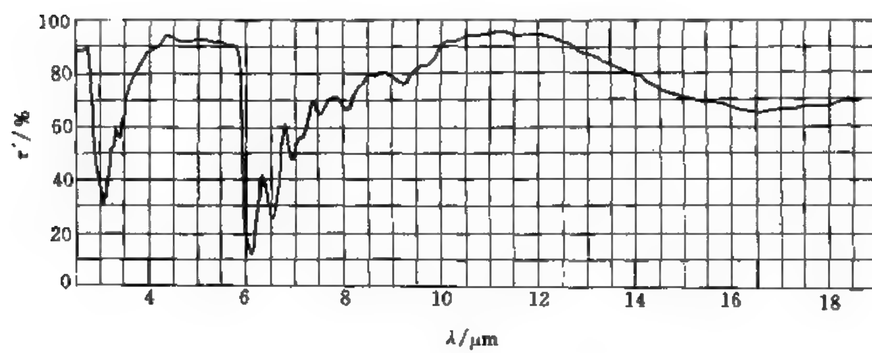


图 19-343 明胶的红外光谱(水溶液流延薄膜)

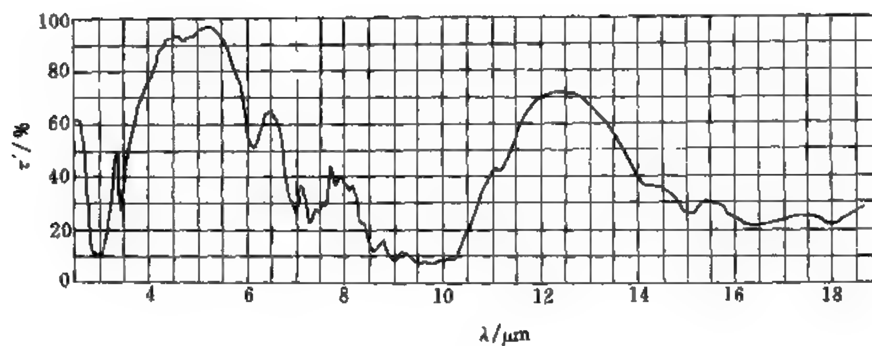


图 19-344 纤维素Ⅰ的红外光谱(溴化钾压片)

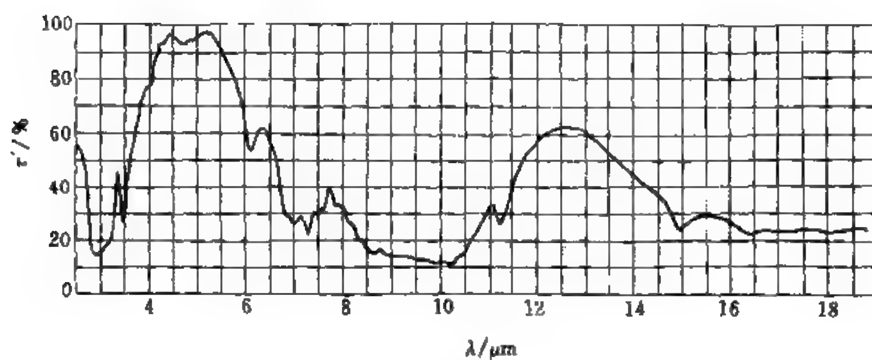


图 19-345 纤维素Ⅱ的红外光谱(溴化钾压片)

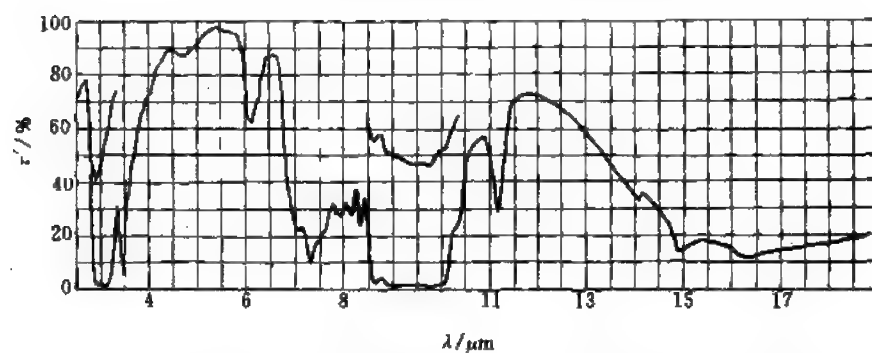


图 19-346 再生纤维素(主要是纤维素Ⅱ)的红外光谱薄膜(25μm)和溴化钾压片

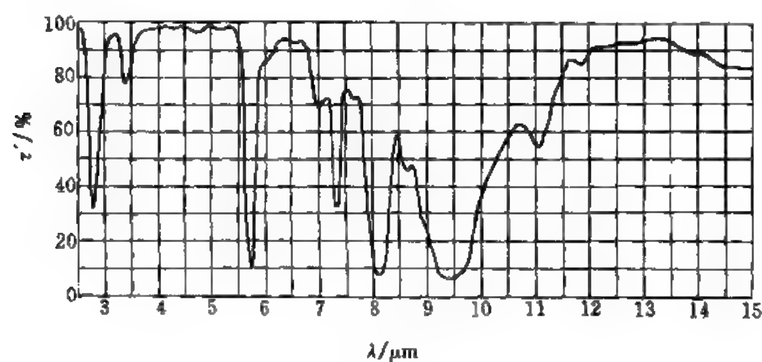


图 19-347 一乙酸纤维素酯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

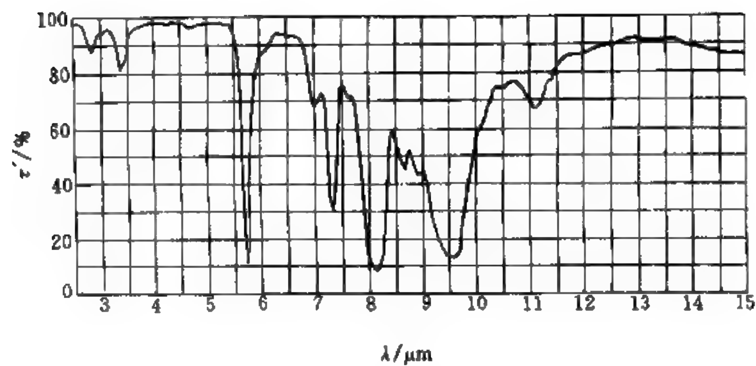


图 19-348 三乙酸纤维素酯的红外光谱(甲酸溶液流延薄膜)

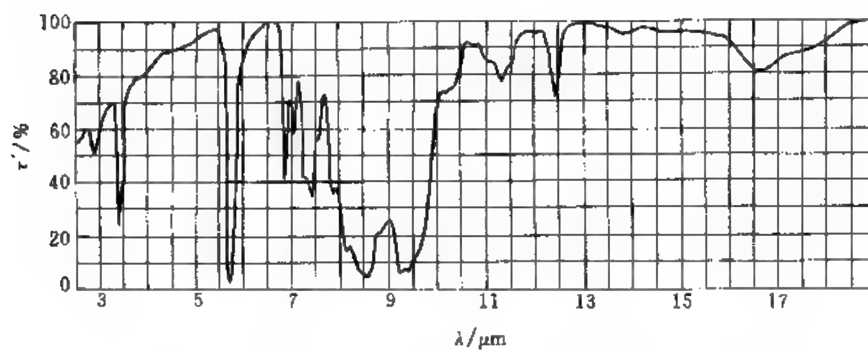


图 19-349 三丙酸纤维素酯的红外光谱(丙酮溶液流延薄膜)

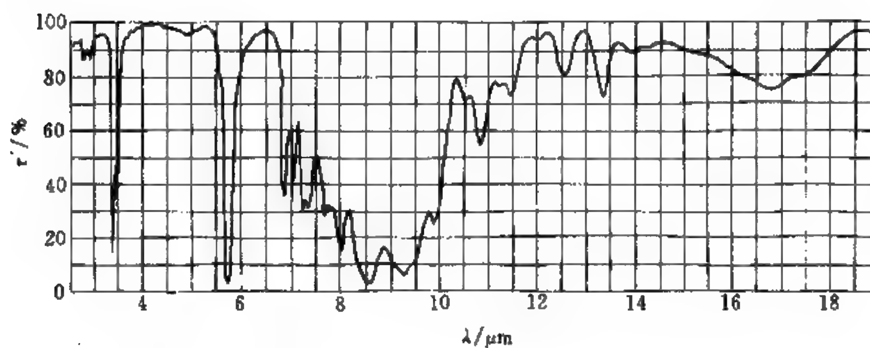


图 19-350 三丁酸纤维素酯的红外光谱(氯仿溶液流延薄膜)

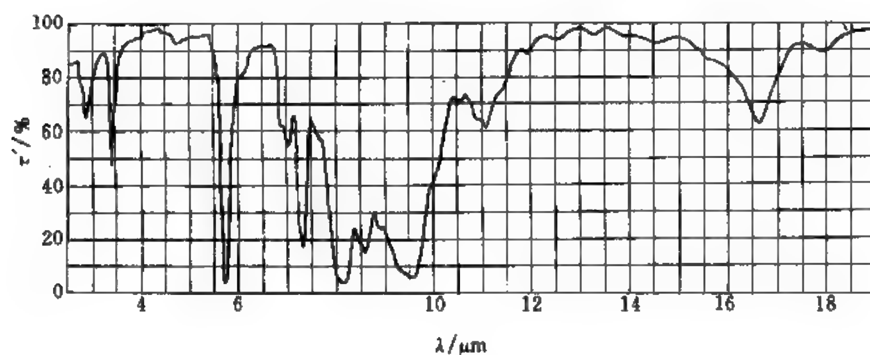


图 19-351 乙酸丁酸纤维素酯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

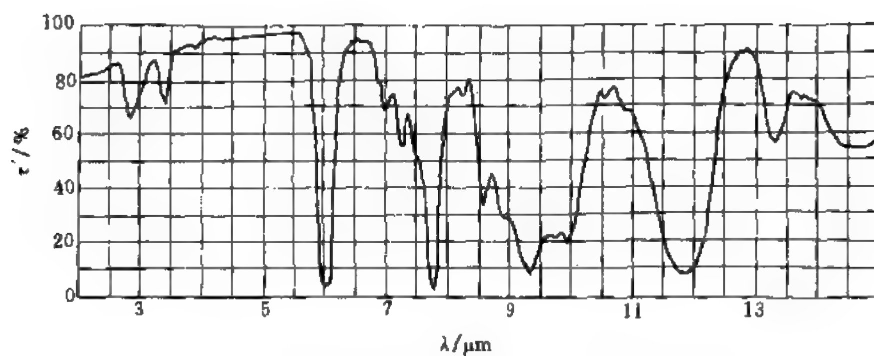


图 19-352 硝酸纤维素酯的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

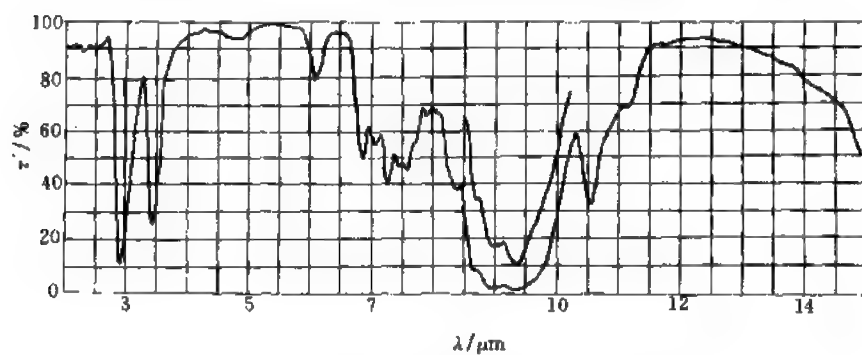


图 19-353 甲基纤维素的红外光谱(溴化钾压片)

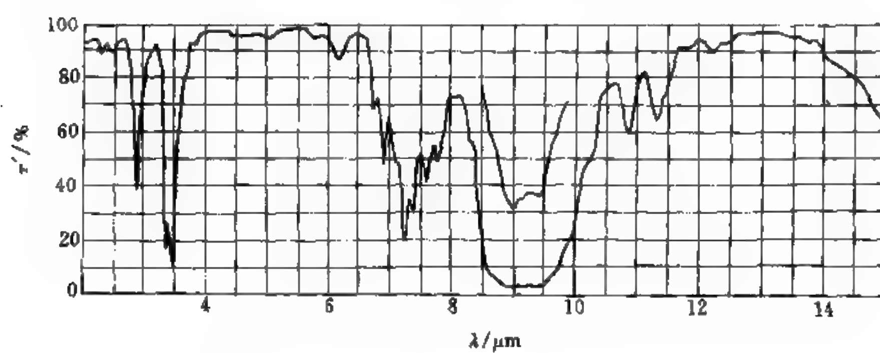


图 19-354 乙基纤维素的红外光谱(二氯乙烷溶液流延薄膜)

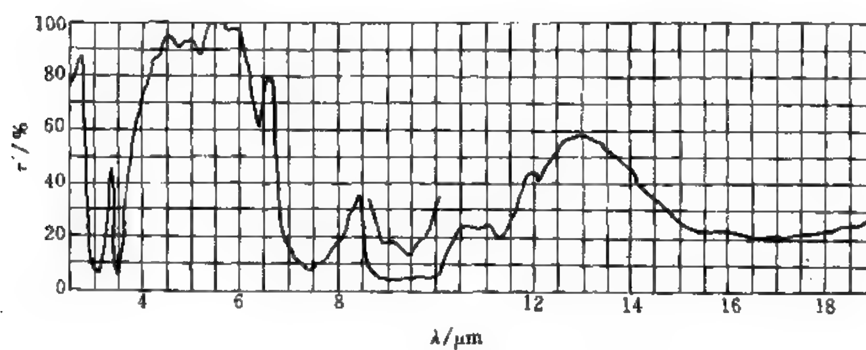


图 19-355 羟乙基纤维素的红外光谱(水溶液流延薄膜)

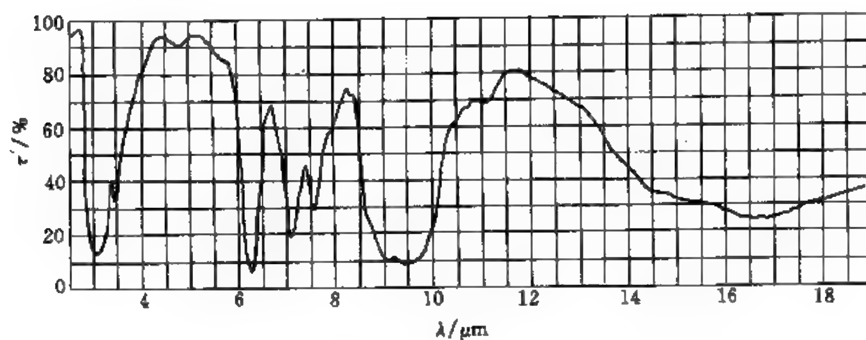


图 19-356　羧甲基纤维素钠盐的红外光谱(水溶液流延薄膜)

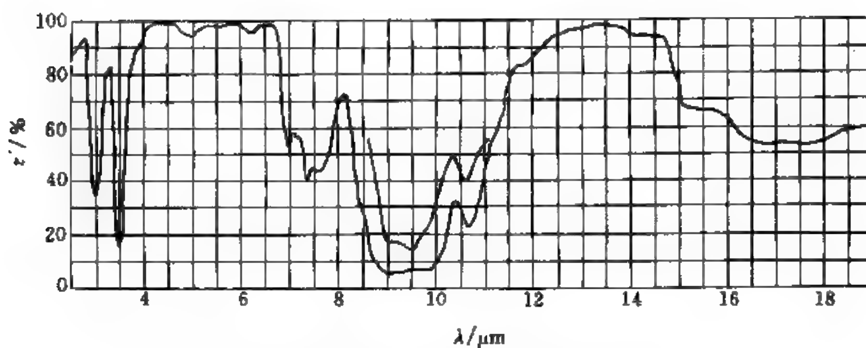


图 19-357　甲基羟乙基纤维素的红外光谱(水溶液流延薄膜)

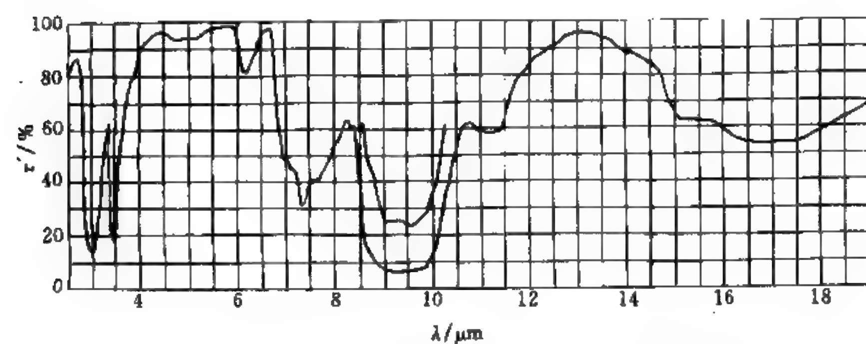


图 19-358　乙基羟乙基纤维素的红外光谱(水溶液流延薄膜)

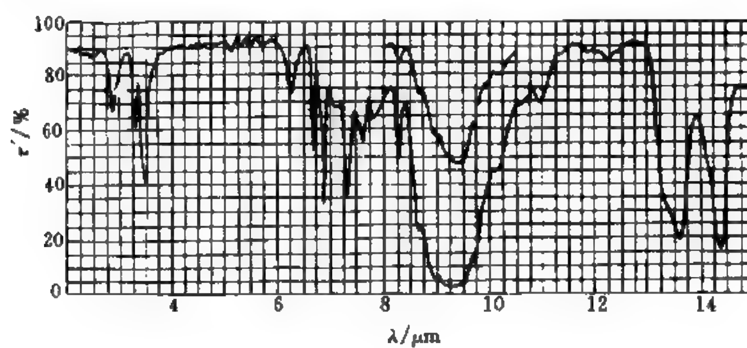


图 19-359　苄基纤维素的红外光谱(苯溶液流延薄膜)

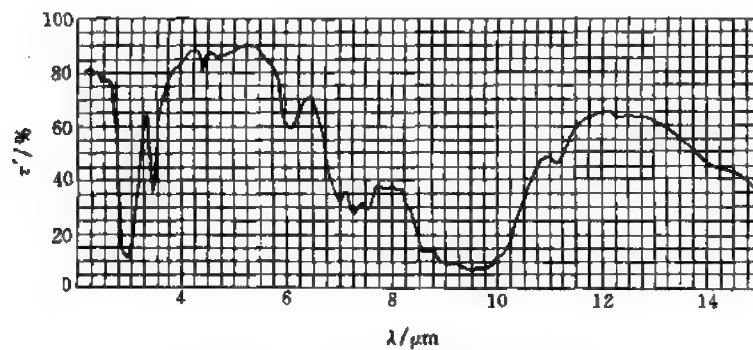


图 19-360 氰基乙纤维素的红外光谱(溴化钾压片)

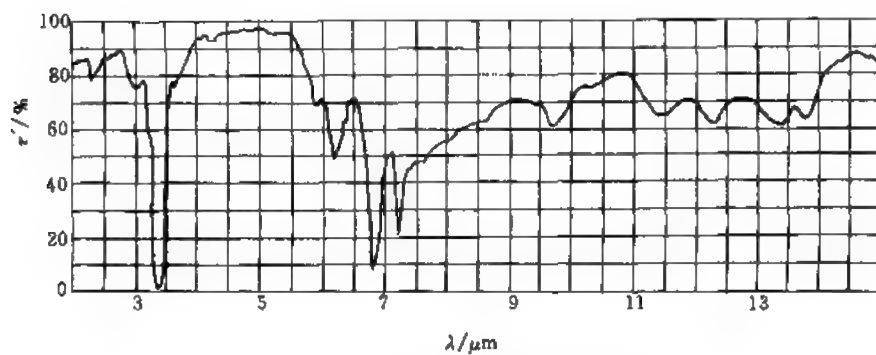


图 19-361 地沥青的红外光谱(熔融薄膜)

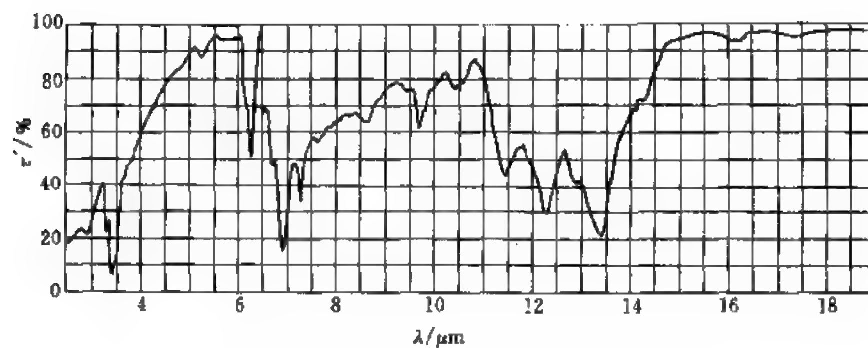


图 19-362 煤焦油沥青的红外光谱(溴化钾压片)

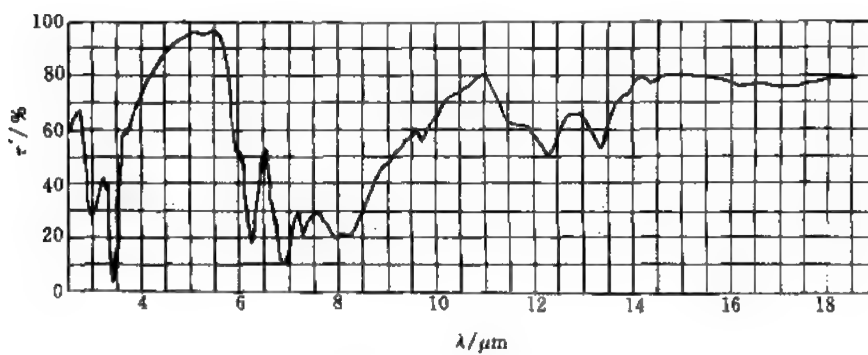


图 19-363 褐煤焦油沥青的红外光谱(溴化钾压片)

参 考 文 献

1 Socrates G. Infrared Characteristic Group Freguencies,Chichester:John Wiley & Sons,Ltd,1980
2 吴瑾光主编．近代傅里叶变换红外光谱技术及应用,(上卷),北京:科学技术文献出版社,1994
3 谢晶曦编著．红外光谱在有机化学和药物化学中的应用,北京:科学出版社,1987
4 Hummel D O. Infrared Analysis of polymers,Resins and Additives Vol 1,Part 2,New York:A Division of John Sons,Inc. 1969.
5 王正熙编著．聚合物红外光谱分析和鉴定,成都:四川大学出版社,1989

第二十章　红外光谱定性与定量分析

第一节　红外光谱定性分析

一、红外光谱的初步解析方法

反映红外光谱特征的是谱带的数目和位置，谱带的形状和谱带的相对强度，如何从这些特征来获得化合物结构信息就是光谱的解析。但至今并没有建立起一套完整的系统解析图谱的方法，早在1958年日本学者岛内武彦曾作过使官能团定性分析系统化的尝试，提出了所谓“八区法”[1]。南京药学院主编的分析化学一书中对红外光谱解析程序提出了所谓“四先、四后，一抓”法[2]，即将解析程序归纳为五句话：“先特征，后指纹；先最强峰，后次强峰；先粗查，后细找；先否定，后肯定；‘一抓’一组相关峰。”这个解析程序，其实质就是从特征区开始，从最强峰入手，先否定可以逐步缩小化合物范围，并结合相关峰，从而确定化合物的类别。目前更为大家采用的是否定法和肯定法[3]。如果已知某波数范围的谱带对于某个基团是特征的，那么当这个波数区没有出现谱带时，可以判断不存在这个基团。肯定法是根据某波数区出现的谱带来判断存在的基团，一般是从强谱带开始，然后再分析其他较特征的谱带。当同一波数区，可能有很多基团都会出现时，这就需要根据一个基团的各种振动频率，从几个波数区谱带的组合来判断某基团的存在。更具体的来说，红外光谱的初步解析程序大致如下：

第一步，首先将整个红外光谱由高频区至低频区分几个波数区段进行检查吸收峰存在的情况。先将红外光谱区划分为特征官能团区，即 (4000～1333) cm^{-1}区和指纹区，即 (1333～667) cm^{-1}区。在官能团区再分为3个波段进行检查：(4000～2400) cm^{-1}区、(2400～2000) cm^{-1}区和 (2000～1333) cm^{-1}区。在指纹区再分为两个波数区进行检查：(1333～900)cm^{-1}区和 (900～667) cm^{-1}区。

在作第一步分析时可参照以下的相关表：

表20-1为负相关表，在表中所列的波数范围若无峰，则不存在相应的基团或化合物；表20-2～表20-6为正相关表，按以上五个波数区，分别给出了可能存在的官能团或化合物；另外在表20-8中给出了特征的宽谱带和在表20-7中给出了特征的倍频或合频谱带。

利用以上各表中的数据可以对红外光谱作出初步分析，确定该化合物是无机物还是有机物；是饱和的还是不饱和的；是脂肪族，脂环族，芳香族，杂环化合物，还是杂环芳香族。可以根据存在的基团进一步确定为哪一类化合物及可能存在的结构单元，为查找标准谱图或对谱图作进一步分析作准备。

作谱图分析，有时在指定特征峰的归属时往往遇到困难，这时需要依靠一些辅助手段，其中比较常用的有：同位素取代法；溶剂移动法；形成复合物法；利用氢化、成盐、酯化和酰胺化、酰化等化学方法和模型化合物对比法等。

第二步，在确定了化合物类型和可能存在的官能团与结构单元后，可以按类细缴查阅各

表 20-1　特征基团频率的负相关表[1]

无吸收带的波数范围		谱带的归属	不存在的基团或化合物
σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$		
4000～3200	2.50～3.13	O—H 和 N—H 伸缩	伯胺和仲胺，醇，酰胺，有机酸和酚
3310～3300	3.02～3.03	C—H 伸缩(不饱和)	炔烃
3100～3000	3.23～3.33	C—H 伸缩(不饱和)	芳族化合物和烯族化合物
3000～2800	3.33～3.57	C—H 伸缩(脂族)	甲基，亚甲基，次甲基
2500～2000	4.00～5.00	X≡Y，X═Y═Z 伸缩①	炔②，丙二烯，氰酸盐，异氰酸盐（或酯）腈，异氰化物，叠氮化物，重氮盐，乙烯酮，硫氰酸盐（酯或根）异硫氰酸盐
1870～1550	5.35～6.45	C═O 伸缩	酯、酮，酰胺，羧酸及其盐，醛，酸酐，酰卤
1690～1620	5.92～6.17	C═C 伸缩	烯族化合物
1680～1610	5.95～6.21	N═O 伸缩	有机亚硝酸盐化合物
1655～1610	6.04～6.21	—O—NO_2 不对称伸缩	有机硝酸盐化合物，对称伸缩出现在（1300～1255）cm^{-1}（7.69～7.97）μm
1600～1510	6.25～6.62	—NO_2 不对称伸缩	有机硝基化合物，对称伸缩出现在（1385～1325）cm^{-1}（7.22～7.55）μm
1600～1450	6.25～6.90	芳环的骨架振动	芳环系统
1490～1150	6.71～8.70	H　C—H 变形	甲基、亚甲基
1420～990	7.04～10.10	S═O 伸缩	硫代氧化物，硫酸盐，亚硫酸盐（酯），亚磺酸或酯，磺酸盐（或酯）磺酸、砜，磺酰氯，磺酰胺
1310～1020	7.63～9.80	C—O—C 伸缩	醚
1225～1045	8.16～9.67	C═S 伸缩	硫酯，硫脲，硫代酰胺
1000～780	10.00～12.82	C═C—H 变形	脂肪族不饱和
900～670	11.11～14.93	C—H 变形	取代芳香族
850～500	11.76～20.00	C—X 伸缩（X：Cl，Br 或 I）	有机卤化物
730～720	13.70～13.90	$(CH_2)_{n\geq 4}$	亚甲基 $(CH_2)_{n\geq 4}$

① X，Y 和 Z 表示 C、N、O 和 S 中的任一种。

② 因官能团的对称性该谱可能不存在。

表 20-2　（4000～2400）cm^{-1}波数区出现的主要特征吸收谱带

范围 σ/cm^{-1}	官能团或化合物	范围 σ/cm^{-1}	官能团或化合物
3700～3500	—OH醇(强)，酚(强)(游离)	3210～3150	—NH_2伯酰胺(强)
3520～3320	—NH_2芳香胺(强)，伯胺(中)，酰胺(中)	3200～3000	—NH_3^+氨基酸(中)
3420～3250	—OH醇(强)，酚(强)	3100～2400	—COOH羧酸(强，宽)
3370～3320	伯酰胺（强）	3100～3000	芳香 C—H，—CH_2 和 H\C═C/H
3320～3250	—NOH肟(中)，C≡C—H(中)	2990～2850	C—CH_3(中)；CH_2—(强)
3300～3280	—NHR仲酰胺(强)	2850～2700	O—CH_3(中)；N—CH_3(中)；醛(中)
2750～2350	—NH_3^+X（强）	2600～2540	S—H 硫醇(弱)
2720～2560	O‖—P—OH(中)	2410～2280	P—H 膦(中)
3260～3150	NH_4^+（强）		

表 20-3　（2400～2000）cm^{-1}波数区出现的主要特征吸收谱带

范围 σ/cm^{-1}	官能团或化合物	范围 σ/cm^{-1}	官能团或化合物
2305～2285	—C≡N→O(强)	2175～2150	—N═C(强)
2300～2230	重氮盐—N≡N$^+$ X^-（中～强）	2175～2140	S—C≡N(中～强)
2260～2240	腈—C≡N(弱～中)	2180～2100	Si—H(强)—N═N^+═N^-（中）
2260～2190	炔—C≡C—(不定)	2150～2100	N═C═N(特强)
2225～2210	>N—C≡N(强)		

表 20-4　（2000～1333）cm^{-1}波数区出现的主要特征吸收谱带

范围 σ/cm^{-1}	官能团或化合物	范围 σ/cm^{-1}	官能团或化合物	范围 σ/cm^{-1}	官能团或化合物
2000～1650	酚(弱)	1780～1760	γ-内酯(强)	1710～1690	羧酸(强)
1980～1950	—C═C═C—(强)	1760～1725	酐(特强)	1690～1640	>C═N—
1870～1650	C═O	1750～1730	δ-内酯(强)	1680～1620	伯酰胺(强)
1870～1830	β-内酯(强)	1750～1740	酯(特强)	1680～1650	亚硝酸酯
1870～1790	酐(特强)	1740～1720	醛(强)	1680～1655	>C═C<（强）
1820～1800	R—CO—X(强)	1720～1700	酮(强)		

续表

范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物	范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物	范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物
1680～1660	>C=N—(中～强)	1620～1595	伯胺(强)	1475～1450	CH_2—(特强);CH_3(强
1670～1655	仲酰胺(特强)	1615～1605	乙烯醚(强)	1440～1400	羧酸(中)
1670～1650	C_6H_5—C(=O)— (强)	1615～1590	酚(中)	1430～1395	NH_4^+(中～强)
1670～1640	叔酰胺(强)	1615～1560	吡啶(强)	1420～1400	—CO—NH_2
1670～1630	>C=C (中～强)	1610～1580	氨基酸(宽)	1400～1370	叔丁基(中)
1650～1590	尿素衍生物(强)	1610～1560	羧酸盐(特强)	1400～1310	羧酸盐(宽)
1640～1620	C=N— (中～强)	1590～1580	—NH_2,脂肪伯酰胺(中)	1390～1360	—SO_2Cl(强)
1640～1610	R—O—N=O	1570～1545	—NO_2(特强)	1380～1370	C—CH_3(强)
1640～1580	—NH_3^+(强)	1565～1475	仲酰胺(特强)	1380～1360	C—$(CH_3)_2$(中)
1640～1530	β-二酮,β-酮酯	1560～1510	三氮杂苯(强、尖)	1375～1350	—NO_2(强)
		1550～1490	—NO_2(强)	1360～1335	—SO_2NH_2
		1530～1490	—NH_3^+(强)	1360～1320	—NO_2(特强)
		1510～1485	酚(中)		

表 20-5 (1333～900) cm⁻¹波数区出现的主要特征吸收谱带

范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物	范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物	范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物
1335～1295	S(=O)(=O) (特强)	1255～1240	叔丁基(中)	1120～1030	—C—NH_2 (强)
1330～1310	—CH_3 (强)	1245～1155	—SO_3H (特强)	1095～1015	Si—O—Si(特强), Si—O—C(特强)
1310～1250	—N=N(O)— (强)	1240～1070	—C—O—C (强～特强)	1080～1040	—SO_3H (强)
1300～1175	P=O (特强)	1230～1100	—C—N— (强)	1075～1020	—C—O—C— (强)
1300～1000	C—F (特强)	1200～1165	—SO_2Cl (强)	1065～1015	>CH—OH (强)
1285～1240	Ar—O (特强)	1200～1015	C—OH (特强)	1060～1025	—CH_2—OH (特强)
1280～1250	Si—CH_3 (特强)	1190～1140	Si—O—C (强)	1060～1045	>S=O (特强)
1280～1240	>C—C< 环氧(—O—) (强)	1170～1145	—SO_2NH_2	1055～915	P—O—C (特强)
1280～1180	—C—N— (强)	1170～1140	—SO_2—	1030～950	环振动(弱)
1280～1150	—C—O—C (特强)	1170～1130	Ar—CF_3 (强)	1000～970	CH=CH_2 (特强)
		1160～1100	>C=S (中)	980～960	—CH=CH (特强)
		1150～1070	C—O—C (特强)	960～910	—C—OH
		1140～1090	—C—O—H (强)	920～910	—CH=CH_2 (特强)

表 20-6 (900～667) cm⁻¹波数区出现的主要特征吸收谱带

范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物	范围 σ/cm⁻¹	官能团或化合物
900～815	CH_2=C(R)(R′) (特强)	825～805	1,2,4-三取代苯(特强)
890～805	1,2,4-三取代苯 (特强)	820～800	三氮杂苯(强)
860～760	R—NH_2 (特强，宽)	810～790	1,2,3,4-四取代苯(特强)
860～720	—Si—C— (特强)	785～680	1,2,3 三取代苯(特强)
850～830	1,3,5-三取代苯(特强)	770～690	单取代苯(特强)
850～810	Si—CH_3 (特强)	760～740	邻二取代苯(强)
835～800	—CH=C< (中)	760～510	C—Cl(强)
830～810	对二取代苯(特强)	740～720	—$(CH_2)_n$— (弱)
		730～675	—CH=CH— (强)

表 20-7 倍频或合频谱带

范围 σ/cm⁻¹	化合物类别	归属和说明
3450	酯	$\nu_{C=O}$ 的倍频
3100～3060	仲酰胺	δ_{NH}的倍频
2700	环己烷	CH 弯曲振动的合频
2700	醛	费米共振引起的双峰 (12800～2700) cm⁻¹
2200～2000	氨基酸和胺的氢卤化物	$\overset{+}{N}H_3$ 的扭转和 $\overset{+}{N}H_3$ 不对称变形振动的合频
2000～1650	芳香族化合物	有若干个带
1900～1960 和	乙烯基化合物	高频带较强
1830～1800		
1800～1780	亚乙烯基化合物	CH_2 面外摇摆的倍频

表 20-8 特征宽谱带

谱带中心或范围① σ/cm⁻¹	化合物类别	归属和说明
3600～3200 (Vs)	醇，酚	ν_{OH}
3400～3000 (Vs)	伯胺	通常是双峰
3400～2400 (S)	羧酸和其他含 OH 基的化合物	形成氢键的 ν_{OH}
3300～2200 (Vs)	氮杂茂（—NH—互变异构体）	NH 伸缩
3200～2400 (Vs)	氨基酸 胺的盐酸盐 嘌呤 嘧啶	十分宽的不对称的谱带
3000～2800 (Vs)	碳氢化合物，所有含 CH_3 和 CH_2 的化合物	ν_{CH}
1700～1350 (S)	氨基酸	
1650～1500 (Vs)	羧酸盐	C(=O)O 的不对称和对称的伸缩振动
1400～1300 (S)		
1250 (Vs)	全氟化合物	
1200 (Vs)	酯，酚	
1150 (Vs)		
1150～950 (Vs)	糖	
1100	醚	C—O—C 桥
1100～900	二醇	
1050	酐	
1050～950	亚磷酸酯，磷酸酯	常常是两个带
920	羧酸	C—OH 变形
830	伯脂肪胺	
730	仲脂肪胺	

① Vs—特强，S—强

类化合物的特征吸收谱带的特征频率表，并考虑影响特征频率移动的各种因素：质量效应、偶合效应、费米共振、立体因素（包括空间障碍，场效应和环的张力等），电性因素（包括诱导效应和中介效应）及氢键的因素等，进一步研究结构细节。

第三步，当以上步骤确定了化合物的可能结构后，应对照相关化合物的标准谱图或者用标准化合物在同样条件下绘制红外谱图进行对照。一般来说，只有知道未知样品的分子式，而且该样品是仅含有单官能团的简单化合物的情况下，才有可能单凭红外光谱对化合物结构作出确认。通常需要结合质谱，核磁共振波谱，以及元素分析等结果才能推断化合物结构。

在解析谱图时，要注意以下几点：

①某吸收带不存在，可以确信某官能团不存在；相反，吸收带存在时不一定是该官能团存在的确证。

②不需要，往往也不可能对光谱中的所有吸收峰指出其归属，首先要注意强峰，但也不忽略某些特征的弱峰和肩峰。

③要注意峰的强度所提供的结构信息，两个特征峰相对强度的变化有时为确证复杂官能团的存在提供线索。

④要注意红外光谱中可能出现的杂质等因素引起的多余谱带和假的吸收谱带（见表 20-9，表 20-10）。

表 20-9 在红外光谱中可能出现的多余谱带[5]

σ/cm⁻¹	化合物或结构	来　源
3704	H_2O	在近红外区使用厚吸收池，可画出在四氯化碳或烃溶剂中非缔合水的—OH 吸收，谱带很锐
3650	H_2O	某些熔融石英窗出现由附着水引起的锐谱带

续表

σ/cm⁻¹	化合物或结构	来　　源
3450	H_2O	溴化钾压片中含微量水引起的宽谱带。很常见，真空干燥可以除去
2347	CO_2（气体）	当双光束没有调整平衡，将出现正的或负的大气 CO_2 的吸收
2326	CO_2（溶解的）	长期保存在干冰中的液体样品有时出现由于溶解的 CO_2 引起的谱带
1996	BO_2	某些天然氯化钠晶体中所含杂质偏硼酸离子引起的谱带
1810	$COCl_2$	除去乙醇的氯仿（用作红外溶剂）曝露在空气中和日光下氧化生成光气引起的谱带，强度随时间而逐渐增强
1754～1695	>C═O	在某些瓶盖、衬里的涂层或釉被溶剂溶解，引起假的 C═O 基谱带，或来自色层分离时，连接管增塑剂及其分解产物的污染
1639	H_2O	在矿物、某些无机盐、纤维素、碳水化合物和烷、芳基磺酸表面活性剂中的夹带水引起的谱带
1613～1515	—C(O)O	卤化碱金属红外窗片，特别是溴化钾，能与羧酸，特别是二元羧酸（如马来酸）反应生成少量的碱金属羧酸盐而出现羧酸阴离子引起的假谱带。溴化钾压片也有类似情况
1428	$CO_3^=$（?）	某些碱金属晶体和溴化钾压片的无机碳酸盐杂质引起的弱谱带
1379	KNO_3	溴化钾中的杂质 KNO_3 引起的吸收，有时会误认为是甲基对称弯曲振动谱带
1355	$NaNO_3$	靠近能斯特光源的 NaCl 窗片与光源点燃时形成的氧化氮及窗片吸着的水汽生成的 $NaNO_3$ 引起的吸收谱带
1265	Si—CH_3	活塞上的硅油脂被溶剂洗下造成的污染
1110	Me-O	由振动磨或玛瑙研钵中的灰尘造成的对溴化钾的污染，出现一宽谱带
1110～1053	Si—O	有些人用玻璃研钵研磨样品制成白油浆糊，有时可能看到在所得光谱中由玻璃粉末引起的宽谱带
980	K_2SO_4	在无机硫酸盐溴化钾压片光谱中有时会看到，此谱带系由于溴化钾与无机硫酸盐的离子交换反应生成 K_2SO_4 引起的
837	$NaNO_3$	来源同 1355cm⁻¹谱带
823	KNO_3	此谱带有时出现在无机硝酸盐溴化钾压片的光谱中。这是由于溴化钾与无机硝酸盐反应生成了硝酸钾
794	CCl_4（气）	由于液池漏，溶剂四氯化碳挥发成气体流入光谱仪器中而引起
787	CCl_4	测定四氯化碳溶液之后，或用四氯化碳清洗液池后没有吹干除净溶剂就测试其他样品将引起此谱带的出现
730	聚乙烯	现在聚乙烯广泛用于制作各种实验室制品，偶而作为样品的污染物而出现
727	Na_2SiF_6	SiF_4 沉积于氯化钠窗片上生成 Na_2SiF_6 引起窗片污染
719	聚乙烯	来源同 730cm⁻¹谱带
697	聚苯乙烯	用于机械振荡磨中混合固体样品和溴化钾的聚苯乙烯瓶，容易磨损，所得的溴化钾锭片，常出现聚苯乙烯的这一谱带
668	CO_2	当仪器两光束不平衡，将出现由大气中的二氧化碳引起的正或负的吸收

表 20-10　在任何波长可能发生的假谱带[5]

原　　因	来　　源
克里士丁生（Christiansen）效应	在用溴化钾压片法或用浆糊法制样时，如果晶体颗粒的大小与辐射波长的大小在同一数量级时，有时在真实吸收带的短波侧看到一假谱带
差示分析	如果在参比光束中用一充满溶剂的液池作差示分析时，在溶剂有强吸收的区域，由于辐射能量不足或没有能量，记录笔便停死了。在一览光谱图时，往往被误认为是谱带，因此在实验中，应对这些无用的范围作出明确的标记
干涉条纹	很平的固体薄片，如果其厚度与红外波长相近，往往出现干涉条纹而被误认为是吸收带，例如在用反射技术观测在金属上面的有机涂层时就是如此
熔融固体	熔融固体的观察有其缺陷，例如，突然结晶（甚至在结晶以后的相变）能引起透过率的快速下降而误认为是吸收带
外界气体	在作双光束实验时，在实验室空气中的一些气体一般不会引起多大干扰，然而当进行校准试验时（如单光束，或测试信号实验）将遇到空气以外的某些气体如空调机漏出的氟里昂气、溶剂蒸气等的谱带
晶体的取向	晶体的取向对光谱有决定的影响。在有一定取向的晶体膜中，某些功能基可处于不与光源发出的辐射作用的位置，此外在光谱仪中的入射辐射往往是部分偏振的，而在转动晶体样品时，吸收带的相对强度将要发生变化
光学衰减器	光梳齿的非线性将在吸收带的边上出现台阶或肩带，在（0～10）%透过率范围内此效应最明显
多晶现象	同一物质的不同晶型显示不同的红外光谱。当解释晶体的红外光谱时，这点应该经常记住。有时将晶体溶于溶剂，然后借蒸发溶剂使之沉淀于盐片上就可以得到不同的晶形。浆糊法或 KBr 锭片法也能引起原始试样晶型的变化
光学切换	光栅和滤光片的切换可在切换点造成假峰

二、标准红外光谱谱图集和红外光谱索引书

在红外光谱定性分析中，无论是分子结构的鉴定还是验证，都需要标准谱图作对照，下

面列出一些常用的标准红外光谱谱图集。

“萨特勒”红外标准图谱集 (Sadter, catalog of infrared standard spectra) 在1956年,由美国费城“萨特勒”研究室编辑出版,到1995年已经收集谱图约150000张,共分两大类,即标准图谱(分为棱镜光谱、光栅光谱和傅里叶红外光谱)和商品光谱。如按化合物相态分类,又可分为凝聚相(液-固相)和气相两大类,前者13万张,后者1万张。标准光谱(Standard spectra)是指纯度在98%以上的化合物的光谱,约有6.5万张。商品光谱(Commercial spectra)是指工业产品的光谱,按ASTM分类法分成23类,共有7万张,其中包括:(1)农业化学品;(2)多元醇;(3)表面活性剂;(4)单体和聚合物;(5)增塑剂;(6)香料和香味;(7)脂肪、蜡和衍生物;(8)润滑剂;(9)橡胶化学品;(10)纤维;(11)溶剂;(12)中间体;(13)石油化学品;(14)药物;(15)甾体;(16)纺织化学品;(17)食品添加剂;(18)颜料、染料和着色剂;(19)松脂、天然树脂及树胶;(20)涂料化学品;(21)处理水的化学试剂;(22)常用麻醉品;(23)无机物。此外还有蒸气相光谱、聚合物裂解物谱图,ATR光谱,生物化学光谱等。商品光谱中的图谱所代表的化合物不一定是纯物质,有些谱图上并不提供化合物的名称和结构,而提供商品牌号。该图谱逐年增印,每年增添纯化合物谱图约2000张。光谱图采用波长线性和百分透光度线性坐标,波长范围(2~15)μm,同时给出了化合物名称,分子式,分子量,结构式,熔点或沸点,样品来源和制样方法。萨特勒红外标准图谱集是世界上收集谱图最多的红外图谱集,被普遍采用。

ALDRICH 红外光谱库 (The Aldrich Library of Infrared Spectra) Pouchert C. J. (Ed.), Aldrich Chemical Company, Inc., P.O. Box 355, Milwaukee, WI53210. 该谱图集包括各类有机化合物的谱图共8000张,按官能团分类,最后备有名称字顺索引和分子式索引,谱图合订为一卷本,查找方便,格式是横坐标为线性波长(2.5~16μm),每页包含8张谱图。

DMS 穿孔卡片 (Documemtation of Molecular Spectra) Butterworth and Co. Ltd. London WC2, England 由英国和前西德编制,分3种类型:有机化合物卡片(桃红色),无机物卡片(淡蓝色)和文摘卡片(淡黄色),带有谱图(线性波数格式),峰位波数表,结构信息,分子量,熔点,沸点和密度,约有23000张谱图。根据两种方式穿孔:化合物结构(碳原子数,分子的基本骨架结构和取代基类型等)穿孔,孔开在卡片的顶端和一侧;主要峰位置穿孔,在卡片的底边和另一侧,利用一根细棒根化合物结构或主要峰位置,挑选出所要谱图,该类卡片目前已停止出版,并很少使用。

Selected Infrared Spectral Data American Petroleum Institute (API) Research Project 44, Department of Chemistry, Texas A & M University, College Station TX77843. 为美国石油研究院第44研究计划,从1943年开始出版,其中约80%是烃类的光谱,其他则是卤代烷,硫化物,含氮化合物及少量简单的醛、酮、醇、酯的光谱,至1971年共收集3000多张谱图。早期谱图为线性波长,近期改为线性波数,附有结构信息,样品来源及状态,有两种索引:谱图编号和分子式索引。

IRDC 卡片 (Infrared Data Committee Japan) Sanyo Shuppan Boeki Co., Hoyu Bldg., 8, 2-Chome, Takara-Cho, Chuo-Ku, Tokyo, Japan。大约有14000张光谱,类似于DMS数据卡片,边缘穿孔,近期的谱是光栅光谱,带有结构及其他数据,该卡片已很少使用。

聚合物,树脂和添加剂的红外分析 (Infrared Analysis of Polymer, Resins and Additives) Hummel D. O., Scholl F. 包括1745张高聚物及树脂的谱图及1000张添加剂的谱图,这是一本在高聚物剖析工作中常用的谱图集。

聚合物和塑料分析的 Atlas 红外图谱集 (Atlas of Polymer and Plastics Analysis, Second, Completely revised edition) Vol. 1, Polymer, Structures and Spectra (1978); Vol. 2, Plastics, Fibres, Rubbers, Resins (1983); Vol. 3, Additives and Processing Aids (1981); Hummel D. O., Scholl F., (Eds.), Carl Hanser Verlag, Muni ch, Venna。该书第二版分为三册：第一册为聚合物的结构与红外光谱图；第二册为塑料、纤维、橡胶及树脂的红外光谱图和鉴定方法；第三册为以剂和加工助剂的红外光谱图和鉴定方法，约有 1100 张谱图，分为十一部分：增塑剂，无机填料和颜料，有机颜料，紫外稳定剂和增亮剂，抗氧剂，聚氯乙烯稳定剂，抗静电剂，防腐剂，加速剂，加工助剂、溶剂。

用在涂层工业上的红外光谱 (An Infrared Spectroscopy Atlas for the Coatings Industry) Vandeberg J. T. (Ed.) Federation of Societies for Coatings Technology 1315 Walnut Street, Philadelphia, Pennsylvania 19107, 1980. 谱图按聚合物，单体，溶剂，无机颜料和填充剂，有机颜料和其他各类助剂排列，总计有 1433 张谱图，有谱图号索引和字顺索引。

红外和化学法鉴定和分析表面活性剂 (Identification and Analysis of Surface Active Agents by Infrared and Chemical Methods) Hummel D. O. 包括 466 个表面活性剂的谱图。

有机磷化合物红外光谱 (Atlas of IR Spectra of Organophosphorus Compounds) Shagidullin R. R., Chernova A. V., Vinogradova K. S., Mukhametor F. S., Kluwer; Dordrecht, The Netherlands. 1991.

Coblentz Society Spectra (P. O. Box 9952, Kirkwood, MO631 22) 共收集 10000 张谱图，每卷 1000 张，另有 Coblentz Society Desk Book of Infrared Spectra Clara Craver, 870 张光栅光谱，按化学分类编制，带有文本说明，可做教学辅助。

The Aldrich Library of FT-IR Spectra C. J. Pouchert (Ed.), Aldrich Chemical Company, Inc., P. O. Box 355, Milwaukee, W153201 此谱图集为两卷本，包括 10780 张傅里叶变换红外光谱，每页 4 幅，波数线性，附有字顺及分子式索引。

已出版的可作为标准的矿物红外光谱图集有：

Minerai spektren I **und** I (1962, 1966 H. Moenke) 收集了 400 多种矿物的 (4000～400) cm^{-1}红外光谱，为棱镜光谱。

Infrared Spectra of Inorganic Compounds (1971) R. A. Nyouist and R. D. Kagel. 1971 包括 892 个无机物谱图，(3800～45) cm^{-1}，其中有为数不多的矿物光谱。

Infrared spectra of Minerals and Related Inorganic Compounds (1975) J. A. Gadsden. 收集了 600 多个矿物和 100 多个有关化合物的红外光谱数据。

Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their Admixtures (1976) H. W. van der Marel and H. Beutelspacher. 收集了粘土矿物及其混合物的红外光谱。

矿物红外光谱图集 彭文世、刘高魁编著，科学出版社，1982. 收集了 583 种矿物的红外光谱。

矿物的红外光谱 V. C. 法默编，应育浦等译，科学出版社，1982.

Инфракрасные Спектры Минералов А. И. Болдырев, 1976. 收集了矿物的红外光谱。

有关药品红外光谱集有：

药品红外光谱集 中华人民共和国卫生部药典委员会编，1990. 1990 年版共收载 582 种红外光谱图。

此外还有：1980 年版英国药典 IR Reference Spectra 及其第一、第二补充本及日本药局方

各版及解说书。

目前出版的标准红外光谱谱图集所收集的谱图数其数量总是有限，大量的谱图分散在期刊或专著中。如果在标准谱图集中查不到自己所要的谱图，可以利用红外光谱的索引书查找其线索，也可以通过 C. A. 的化学物质索引（Chemical Abstracts index）查找。下面列出了一些红外光谱的索引书。

已发表红外光谱的化合物分子式名称和参考文献索引 （Molecular Formula List of Compounds Names and References to Published Infrared Spectra）美国材料试验学会（ASTM）编写（1969）包括 92000 种化合物的红外光谱的出处，有分子式和名称索引。

红外吸收光谱索引 （Infrared Absorption Spectra Index） H. M.，Hershenson，Indices for 1945—1957 and 1958—1962. Academic Press，New York，1959 and 1964.

已发表红外光谱索引 （An Index of Published Infrared Spectra.）英国航空部技术情报和图书馆出版(1960)包括截至 1957 年发表的 10000 篇文献中所讨论的光谱(第一卷及第二卷)。

有机化合物的光谱数据和物理常数 （Atlas of Spectral Data & Physical Constants for Organic compounds，2nd ed.，Grassell J. C. and Ritchev W. M. (Eds.) CRC Press Inc.，2000 Corporate Boulevard NW，Boca Raton，FL33431，1957.

红外，拉曼和微波光谱近代文献目录 Current Literature Lists of IR，Raman，and Microwave spectra，Butterworth and Co. Ltd.，London，1967 onmard

续表

Name	C	H	Br	Cl	F	I	N	O	P	S	Si	M	FUNCTIONALITY					PRISM	GRATING	U.V	NMR	D.T.A
Aceticalid/4-CHLORO-M-PHENYLENE-DIOXYDI-, M	10	9		1				6					6	72	83	3	3	11931	—			--
Aceticacid, /4-CHLORO-O-TOLYLOXY/,	9	9		1				3					6	72	83	3	3	5667		3794		1506

这个索引是按“官能团性状”(Functionality)这一栏的数字序列编排的，若数字序列相同，则按化合物名称字顺排列。“官能团性状”一栏共分为五列，表中第一行前三列中的6，72，83分别为官能团的类号，第四列的“3”表示有3种官能团，(最多为9种，甲基、苯基等取代基不予计数)，第五列的“3”表示该化合物属芳香族（共分6类：1—脂环族；2—脂肪族；3—芳香族；4—杂环化合物；5—杂环芳香族；6—无机化合物）。

官能团如何分类可以根据该索引中所给出的“官能团分类指南（Key to the Functional Group Nutation)。由这个分类指南知道上列前三列的6、72、83分别为羧酸，醚，氯化物的分类号。由此可见6、72、83、3、3实际上是带有羧基，醚，氯三种官能团的芳香族氯代醚酸的分类号。若化合物只有二种官能团，则第三列空白。在实际使用中，为便于查出化合物中各官能团的类号。该索引还附有“官能团字顺索引”(Functional Group Alphabetical Index）和官能团图表（Graphic Description of Functional Group)，以供使用。

下面举例说明该索引的使用。

某化合物的红外光谱如图20-1所示，从这个光谱中我们看到，在1725cm^{-1}有一强吸收峰，这通常是 C═O 的吸收峰，而在2700cm^{-1}附近有峰，说明这个羰基是醛羰基，此外1600、1500、740、694cm^{-1}的吸收峰都表明有一单取代苯环。据此我们可初步估计该未知物可能是一单取代芳香族醛，为了确切知道该化合物结构，可利用“化学分类索引”，按单取代芳香醛编类为46,-,-,1,3，再按此分类号查索引，得到约40个芳香醛的光谱号，然后逐一核对得知红外棱镜标准光谱 No17410苯丙醛的光谱与此最相似。由此可见该化合物很可能就是苯丙醛。

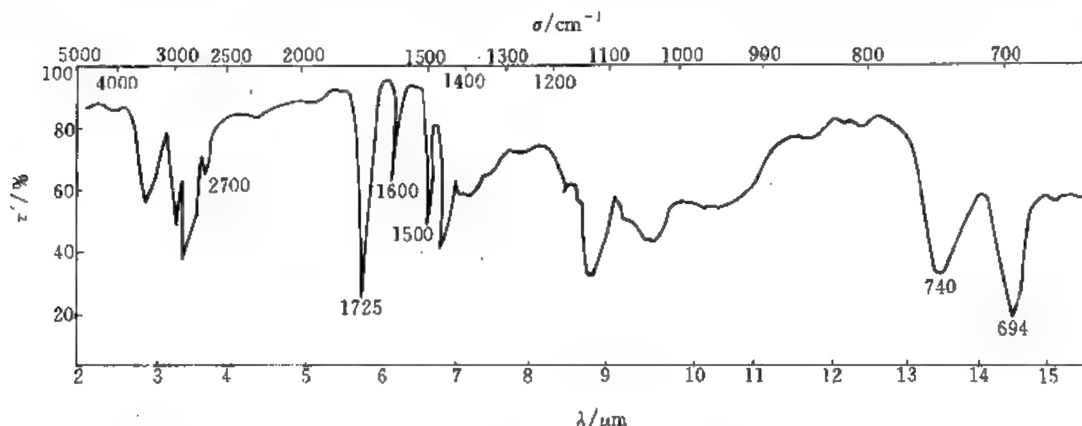


图 20-1　某化合物红外图

（4）号码索引（Numerical Index)

这个索引只是一个完整的清单，无实用价值。

除了以上几种索引外，还有一种专门设计的索引，红外标准光谱的谱线索引（Wave length

Index，又叫 Spec Finder)。

(5) 谱线索引 (Spec-Finder)

红外棱镜标准光谱和红外光栅标准光谱都各自编有“谱线索引”使用方法大致相同。下面介绍棱镜的谱线索引。

红外棱镜光谱的谱线索引的形式如表20-12所示。

表 20-12　谱线索引

14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	STRONGEST BAND	CHEMICAL CLASS				INDEX NUMBER
4	5		·	4	6	8	1	9	8	·	4	9	14.4	46		1	3	17410
4	5		—	—	7	—	0	7	—	—	3	··	14.4	36		1	3	42069
4	5		—	—		—		9	—		.—	·	14.4	73	84	2	3	34471
4	5	—		—	—		—	7	·	—		—	14.4	74		6		25580

由表20-12可知，从2到15μm 范围内分成13个波长区段，右面的第3列是最强峰的位置，第2列是该化合物的分类号，第一列为光谱图号。仍以上例（见图20-1）来说明谱线索引的使用。

第一步：编数码

把未知物光谱中出现的吸收峰编成数码，并按如下方式写在小纸条上，把最强峰的位置记在旁边。

14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	最强峰
4	5	—	··	4	6	8	1	9	8	·	4	9	14.4

在编写数据时必须注意以下几点：

①如果未知物的光谱图以波数为等间隔并以 cm^{-1}表示吸收峰位置时，应利用下式换算成以 μm 为单位：

$$\lambda/\mu m=\frac{10000}{\sigma/cm^{-1}}$$

②当一个吸收峰比较弱时，即百分透光率大于60%时，这个吸收峰通常不编码。除非这样的吸收峰是有影响的特殊吸收。如果这一区没有百分透光率小于60%的吸收峰，则以横线“—”表示，绝对不能用“0”表示。

③如果在同一区有二个强度相似的吸收峰，一般来说任取其一都可以，因为在谱线索引中把各种可能的情况都编入。但为了扩大查到的可能性，最好把各种可能的情况都编写成数码。

④吸收峰的位置应尽可能写正确（误差±0.1μm）为扩大查到机会，应把±0.1μm 的各种可能都考虑进去，尤其是最强峰更应如此，在本例中的最强峰为14.4μm，那么我们应取14.3μm，14.5μm 三种情况进行查对。

⑤在萨特勒标准光谱中最强峰一般在透光率20%～0%这个范围内，故我们也应使要查对的未知物的最强峰达到这一透光率范围。

第二步：与索引核对数码

把编好的未知物光谱的数码去与谱线索引核对。先比较最强峰，然后再依次比较。找出数码基本相符的光谱，再核对光谱图。本例中数码基本相符的光谱号为17410。再核对光谱图完全一致，由此可知该未知物为苯丙醛。

四、红外光谱数据库、红外检索系统及专家系统

（一）红外光谱数据库

早在1951年，为了利用计算机进行自动谱图检索，已经提出将光谱的数字化表示形式

存放在IBM计算机穿孔卡片上的想法，目前已建立的红外光谱数据库主要有：

ASTM红外光谱卡片　在50年代初到1974年间，美国ASTM编辑145000张机读红外光谱卡片，1970年发展为磁带形式，这是世界上最早，也是最大的红外光谱数据库。ASTM所包括的子文件为：

①美国石油研究院第44研究计划；

②Sadtler实验室谱图集；

③美国国家研究委员会——国家标准局（NBS）的Atlas；

④摘自文献的谱图；

⑤分子光谱学文档；

⑥Coblentz学会谱图集；

⑦企业部门所收集的谱图；

⑧日本红外光谱委员会的谱图集。

ASTM红外光谱数据库的缺点是该数据库重复谱图较多，仅以谱峰位置进行二进制编码，未考虑峰的强度及形状。目前该数据库已不再更新，仍由美国Sadtler实验室以Sadtler/ASTM IR光谱索引磁带方式发行。

Sadtler谱库　Bio-Rad公司Sadtler研究实验室经过30多年的积累，提供了超过150000张数字化红外光谱，其中12000张气相标准谱图库，65000张凝聚相标准谱库和70000张商品红外标准谱库。这些光谱数据分为30多个子数据库。Sadtler谱库已被不少仪器生产厂家的红外光谱检索系统采用。

Aldrich/Nicolet凝聚相谱图库　Nicolet公司和Aldrich化学公司合作建立，收集了10607张，1993年扩展为15682张，包括了大部分市售有机化合物和金属有机化合物谱图。在该数据库中还存有如分子量、熔点、沸点、密度和折光指数等化合物的参数。

Sigma生物化学谱库　10411张。

Nicolet蒸气相谱库　8654张。

Georgia州犯罪实验室麻醉剂谱库　1940张。

多伦多法庭谱库　3549张。

Aldrich蒸气相谱库　5010张。

Sadtler Spec-Finder数据库　约有98000个化合物光谱的Sadtler谱库以被压缩的格式进行数字编码，代码以数字顺序排列，用于快速检索。

PE谱库　由Perkin-Elmer公司自己建立，包括2700张常见有机和无机化合物谱图。

固相药物FT-IR谱库　Georgia State Crime Lab建立1400张。

EPA气相FT-IR谱库　3300张

此外还有：中国科学院上海有机化学研究所红外数据库（80000张）；福州药检所建立了包括13万张光谱峰值表数据库；公安部第二研究所建立了炸药，橡胶等方面的专项小型数据库；福建医学研究所建立了PC-IR红外微机数据库系统，包括Sadtler标准红外谱图5.9万张。

（二）红外检索系统

多年来已经发展相当数量的红外光谱检索系统，主要的一些检索系统如下：

FIRST-I系统　由Erley在道化学公司负责建成，程序按IBM系列计算机设计。

SPIR系统　由Jones等研制，其谱图为ASTM的数据源，该系统由加拿大国家研究委员会（NRCC）科学和信息研究院与化学部共同管理，SPIR可通过加拿大网络系统检索。

IRGO 系统 由 Crave 建立，现由 Chemir 实验室管理，它是商业性检索系统，运行在 tymshare sigma 7计算机上，通过国际分时网络系统检索，系统拥有150000张红外谱图。

IRIS 系统 由 Sadtler 实验室研制，数据库包括部分 ASTM 的文件和 Sadtler 标准棱镜红外谱图，共110000张，运行在 Univac 机上，并已加入网络。

COSMOSS 系统 由南斯拉夫 Zupan 等研制，为一综合谱图库系统，红外谱图为92000张，主要部分来自 ASTM，还收集了高聚物谱图，运行在 CDC CYBER172计算机上，检索结果可模拟谱显示在屏幕上。

CISOC-IR 系统 由中国科学院上海有机化学研究所建立，到1986年拥有红外谱图45000张，运行机型为 VAX11/780，程序语言为 FORTRAN77。

NKIR-I 系统 由南开大学中心实验室建立，在全光谱检索前，利用由若干强峰信息建立的多级索引库进行预筛选，大大缩短检索时间，检索10000张仅需30s 左右，运行在 IBM PC/AT 计算机上，全部采用中文菜单式操作。

NICOLET 公司的 FTIR 光谱检索系统 该检索系统包括多种数据库和检索程序，还提供谱图解释软件，分子结构数据库和应用文献数据库，运行在 Intel 386 DX 或486 DX 高速 PC 机上。检索方法包括全光谱检索（Full Spectrum Search），全面性检索（OMNI-Search），预筛选检索（Pre-Filtered Search），PIN-NIC 检索和 SPEC-FINDER 代码检索。

Bio-Rad 公司的 FTIR 光谱检索系统——Search-32 Search-32检索系统采用该公司 Sadtler 研究实验室提供的 Sadtler 谱库，该检索软件提供 Sadtler 谱图格式，采用全光谱检索，此外还有名称及字符串检索、二次检索，子结构检索以及峰值检索等功能。“掩蔽”检索是其特点，即可以在检索过程中忽略光谱的一定范围，以达到排除干扰。标准库及金属有机化合物库含有化合物的结构图形。商业谱库中含有样品来源，制样方法，熔点，沸点，粘度及简单的化学意义与用途介绍。该软件运行在 Spc-3200数据站，亦可运行在 IBM PC/AT，PS/2机上，其软件称 PC-Search。

PERKIN-ELMER 公司的 FTIR 检索软件——PC-SEARCH PC-SEARCH 使用匹配和解释互相补充的方法，谱库除 PE 公司自建的外，还有 Sadtler 的100000多张数字化谱图，谱库中还存贮峰位及强度表和5000多个化合物中可能存在的结构单元，运行在 IBM-PC 机上，要求硬件配置为80386以上，4兆 RAM，硬盘存贮容量120兆。

（三）红外谱图解析中的专家系统

红外光谱计算机检索技术是一种归纳的方法，它离不开预先存贮的红外光谱数据库，因此它受存贮数据量和数据质量的制约。为了完全不依赖任何标准数据库，而是从未知物的光谱数据入手，根据已总结出来的分子结构与谱带特征频率及其他光谱信息之间的关系进行演绎和推理，确定存在的结构单元并最终确定其结构。这就是红外谱图解析中的专家系统。

专家系统主要由三部分组成：①知识库；②推理机和③用户接口。这三个部分彼此是相互独立的，专家系统允许用户问为什么?即需回答推理的逻辑及依据。

目前根据红外谱图信息和结合其他谱图信息建立起来的有机化合物结构解析的专家系统有 H. Woodruff 等建立的 PAIRS 系统，M. E. Munk 等建立的 CASE 系统和佐佐木慎一等的 CHEMICS 系统等。我国光谱学工作者在计算机辅助红外谱图解析方面也做了不少有价值的工作。PAIRS（Program for the Analysis of Infrared Spectra）系统是具有一定代表性的红外光谱解释程序，它包括三个部分：解释规则；规则编译器和解释程序。它可以根据谱图数据和样品状态，最终给出未知物中可能存在的各种官能团及相应的置信度。PAIRS 系统共收入194

表 20-13 聚合物

- 样品
  - (1740～1720)cm^{-1}(vvs)
    - ＋ 1600、1587、1493cm^{-1}(m)
      - ＋ 834cm^{-1}(m)
        - ＋ 1105、1150cm^{-1}
          - ＋ 聚碳（以双酚A为共组分）
          - － 双酚A类环氧树脂
        - － (1333～1212)cm^{-1}(s)
          - ＋ ≈1538cm^{-1}(s)
            - ＋ 聚氨酯类
            - － 醇酸树脂，聚碳酸酯类
          - － 纤维素酯类（含苯环者）
      - － (1449～1429)cm^{-1}(m)
        - ＋ ≈690cm^{-1}(m)
          - ＋ 氯乙烯和乙酸乙烯酯或丙烯酸酯类的共聚物
          - － 2240cm^{-1}(s)
            - ＋ 丙烯腈和甲基丙烯酸甲酯共聚物
            - － 聚乙烯醇缩醛类
        - － ≈1053cm^{-1}(s)
          - ＋ 纤维素酯类
          - － ≈3333cm^{-1}(m)
            - － ≈1538cm^{-1}(s)
              - ＋ 聚氨酯类
              - － 聚酯类
            - 730、719cm^{-1}(m)
              - ＋ 1030cm^{-1}(s)
                - ＋ 乙烯和丙烯酸酯类共聚物
                - － 乙烯和乙酸乙烯酯共聚物
              - － 1150、1190、1245、1270cm^{-1}(s)
                - ＋ 聚甲基丙烯酸甲酯
                - － 聚丙烯酸酯类
    - － ≈3333cm^{-1}(s)
      - ＋ (823,740)cm^{-1}(m)
        - ＋ 酚醛树脂
        - － 环氧树脂类
      - － (1111～1000)cm^{-1}(宽)(vvs)
        - ＋ 有机硅（含苯环者）
        - － (753,699)cm^{-1}(s)
          - ＋ (915,970,998)cm^{-1}(s)
            - ＋ 2240cm^{-1}(s)
              - ＋ 丙烯腈－丁二烯－苯乙烯共聚物
              - － 丁二烯和苯乙烯共聚物
            - － 1780,1860cm^{-1}(vs)
              - ＋ 苯乙烯和顺丁烯二酸酐共聚物
              - － 聚苯乙烯，聚α－甲基苯乙烯
          - － 1190cm^{-1}(s)
            - ＋ 聚氧苯撑
            - － 聚乙烯氮芴

注：括弧中的符号含义同表20-14。

谱图分类鉴定表[57] (一)

- (1600,1587,1493)cm⁻¹(m)
  - −: ≈3333cm⁻¹(s)
    - +: (1667～1639)cm⁻¹(vs)
      - +: 1538 cm⁻¹(s)
        - −: 聚酰胺类
        - 1111 cm⁻¹(s)
          - +: 聚四氢呋喃
          - −: 3333,3200 cm⁻¹(w)
            - +: 聚丙烯酰胺
            - −: 1680cm⁻¹(m)
              - +: 聚吡咯烷酮
              - −: 硝化纤维素
      - −: 848cm⁻¹(m)
        - −: 814cm⁻¹(m)
          - +: 三聚氰胺类
          - −: 聚乙二醇
        - −: 纤维素醚类
    - −: (1449～1429)cm⁻¹(s)
      - +: 2230cm⁻¹(vs)
        - +: 650cm⁻¹(m)
          - 偏氯乙烯和丙烯腈共聚物
          - −: 聚丙烯腈
        - ≈1650 cm⁻¹(s)
          - +: 双烯类橡胶
          - −: 541,820,1518cm⁻¹(m)
            - −: 聚对二甲苯
            - 971,998,1160 cm⁻¹(s)
              - +: 聚丙烯
              - −: 690cm⁻¹(m)
                - +: 1150cm⁻¹(m)
                  - 聚[双(2-氯代甲基)氧代三亚甲基]
                  - 聚氯乙烯
                - −: 聚砜类,聚偏氯乙烯,氯化聚乙烯
      - −: 1111cm⁻¹(宽)(vvs)
        - +: 1266 cm⁻¹(vs)
          - +: 聚甲基硅氧烷
          - −: 聚乙烯基醚类,聚甲醛
        - −: 2857cm⁻¹(vvs)
          - 730,719 cm⁻¹(s)
            - 聚乙烯
            - 聚异丁烯
          - −: 971 cm⁻¹(s)
            - +: 聚三氟氯乙烯
            - −: ≈500 cm⁻¹(m)
              - +: 2980,3020 cm⁻¹(w)
                - +: 聚偏氟乙烯
                - −: 990cm⁻¹(m)
                  - 四氟乙烯和全氟丙烯共聚物
                  - 聚四氟乙烯
              - −: 聚氟乙烯

表 20-14 聚合物谱图分类鉴定表(二)

有1735cm⁻¹(C=O)

- 有 1600cm⁻¹ 和 1500cm⁻¹ 附近
  - 有(芳香族)
  - (脂肪族)无
- 无 1595cm⁻¹ 和 1490cm⁻¹ 附近
  - 有(芳香族)
  - (脂肪族)无

有(芳香族)

cm⁻¹	
1540 1230	聚氨酯
1300 1230 725	间苯二甲酸酯类，醇酸树脂和聚酯
1280 1120 1075 745 705	邻苯二甲酸酯类，醇酸树脂和聚酯
1265 1110 962 725	对苯二甲酸酯类，醇酸树脂和聚酯
1235 1175 830	双酚A环氧树脂类
213 281 700	乙烯基甲苯酯类
758 700	苯乙烯化酯类

(脂肪族)无

cm⁻¹	
1450 1235	聚乙烯乙酸酯
1450 690(b)	乙酸乙烯酯-氯乙烯共聚物 乙酸乙烯酯-偏氯乙烯共聚物
1265 1240 1190~ 1150(s)	聚甲基丙烯酸酯类
1250 1180~ 1150(s)	聚丙烯酸酯类
1110~ 1150(b)	纤维素酯类

有(芳香族)

cm⁻¹	
3250 1225 915 675	酚醛类树脂
3450 1110~ 1070(s)	聚苯醚类
1530 1180 829	双酚A环氧树脂类
814 780 700	聚乙烯基甲苯
760 700	聚苯乙烯

(脂肪族)无

cm⁻¹	
3330 1450 1130(b)	聚乙烯醇
2940(vs) 1470 1380(w) 730~720(d)	聚乙烯
2940(vs) 1470(s) 1160(s) 1130 970	聚丙烯
2250	聚丙烯腈
1640 1540	脲醛树脂 聚酰胺
1640 1280 834	硝酸纤维素
1540 826	三聚氰胺-甲醛树脂
1540 810	脲氰胺-甲醛树脂
1430 690(b)	氯乙烯-偏氯乙烯共聚物
1265 1100~1000(vs)	聚甲基硅氧烷
1250~1150(d,vs) 1110	聚四氟乙烯 [illegible]
1250~1110 1000~910	聚三氟氯乙烯

注：b——宽谱带；
　　s——强谱带；
　　vs——非常强谱带；
　　ms——很强谱带；
　　w——弱谱带；
　　d——双谱带；
　　m——中等谱带。

个官能团和结构单元，69个判别树和11000多解释规则。PAIRS 现有 IBM 和 DEC/VAX 两种版本，PAIRS 软件已经配置在 NICOLET，DIGILAB 和 IBM 等公司的 FTIR 谱仪上。

红外光谱本身只能提供分子的官能团信息，不能给出完整的分子结构，因此要建立化合物结构解析的专家系统，必须将化合物分子式，红外、拉曼、紫外光谱，质谱和核磁共振谱等各种光谱数据联合应用才有可能得到准确完整的结构信息。因面对的分子结构可能是很复杂的，要完成这样的专家系统的整体设计是很困难的，但通过众多光谱学工作者的不懈努力是能建立起来的。目前在我国已建立起来的有中国科学院长春应化研究所结构解析专家系统 ESESOC，胡鑫尧等人完成的解析程序 SGSSP，南京大学忻新泉等的结构解析专家系统 ESSESA 等。

五、红外光谱在聚合物、表面活性剂和增塑剂鉴定中的应用

（一）高聚物红外吸收光谱的系统分类和鉴定

红外光谱在聚合物的鉴定中得到广泛应用，国外已经出版了许多标准聚合物的红外光谱汇编。其中部分已在本章第一节二中介绍，但将谱图逐一查对是十分费时和枯燥的。为此，目前已提出了许多谱图分类鉴定表，它们有助于我们作出初步的判断。在“An Infrared Spectroscopy ATLAS for the Coatings Industry”一书中提供的一种聚合物谱图分类鉴定表如表20-14所示[6]，该表对鉴定涂料聚合物较为适用。

在朱善农等著《高分子材料的剖析》一书中对原来的分类图作了修订和补充，能适用于新型聚合物的鉴定，其分类鉴定表见表20-13。

表20-13中所用的各吸收频率的谱带解释见表20-15。

表 20-15 表20-13中所用的各吸收频率的谱带解释[3]

σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$	谱带解释
≈3333	3.0	氢键结合的 OH 伸缩振动
3200	3.13	NH_2伸缩振动
3020	3.31	$-CH_2-CF_2-$ 的 CH_2伸缩振动
2857	3.50	CH 伸缩振动
2240	4.46	C≡N 伸缩振动
1780,1860	5.62,5.38	五元环酸酐中的 C=O 伸缩振动
1740~1720	5.75~5.81	C=O 伸缩振动
1667~1639	6.00~6.10	$-C(=O)-NH_2$ 的 C=O 伸缩振动
≈1650	≈6.06	非共轭的 C=C 伸缩振动
1600,1587,1493	6.25,6.30,6.70	⌬ 的骨架振动
≈1538	≈6.50	$-NH_2$ 的 N—H 变角振动，$C(=O)-NH_2$ 的 N—H 变角振动和 C—N 伸缩振动的合频
1518	6.59	⌬ 的 C=C 伸缩振动
1449~1429	6.90~7.00	C—H 变角振动，因邻近的碳原子上有电负性强的氯、氧和 C≡N 基，C—C 由1465cm^{-1}移向此波数
1333~1212	7.50~8.25	$C(=O)-O-$ 的 C—O 伸缩振动
1266	7.90	Si—C 变角振动
1270,1245,1190,1150	7.87,8.03,8.40,8.70	C—C—O—C 伸缩振动
1190	8.40	⌬—O—C 伸缩振动
1150,1105	8.70,9.05	S=O 伸缩振动
≈1111	9.0	Si—O 伸缩振动，C—O—C 伸缩振动
1111~1000	9.0~10.0	Si—O 伸缩振动

续表

σ/cm⁻¹	λ/μm	谱带解释
1053	9.50	环状 C—O—C 的 C—O 伸缩振动
1030	9.71	$-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-O-C$ 的 C—O—C 伸缩振动
998,971	10.02,10.30	聚丙烯的结晶带
990	10.10	与 C—F 有关的吸收带
971	10.30	C—Cl 伸缩振动，因邻近碳原子上有氯原子而位移到此
848	11.80	含氮的杂环化合物中的 C—H 变角振动
834	12.00	⌬ 的 C—H 面外振动(苯环上有两个取代基)
820	12.20	⌬ 的 C—H 面外振动(苯环上有对位取代基)
814	12.29	N—C C　　N 骨架振动 N—C
823,746	12.15,13.40	⌬ 的 C—H 面外振动(苯环上有多个取代基)
730,719	13.70,13.91	—$(CH_2)_n$— 的 CH_2摇摆振动
752,699	13.30,14.31	⌬ 的 C—H 面外振动(苯环上有一个取代基)
690	14.50	C—Cl 伸缩振动
650	15.38	C—Cl 伸缩振动
≈500	≈20.0	C—F 的振动

王正熙编著《红外光谱分析和鉴定》一书中，按照吸收带位置和强度不同，编制了聚合物系统鉴定表，见表20-16。表中第一强吸收带共分为13个区，然后再按第二和第三强吸收带确定聚合物。

表 20-16　聚合物按强度系统鉴别法[7]

第一强吸收	第二、三强吸收		聚合物
σ/cm⁻¹	λ/μm	σ/cm⁻¹	
3400～3200 (2.94～3.19μm)	8.00 3.17	1250 1090	部分乙酰化的聚乙烯醇
	5.75 8.00	1740 1250	低水解度的聚乙酸乙烯酯
	6.90～7.00 9.09～9.26 或3.42	1450～1430 1100～1080 或2925	聚乙烯醇
	6.21 9.52	1610 1050	羧甲基纤维素钠盐
	9.35 9.52	1070 1050	纤维素，羟乙基纤维素
	8.13～8.20 6.80～6.90 (或6.67)	1230～1220 1470～1450 (或1500)	酚醛树脂
	6.21 8.62～8.70	1610 1160～1150	间苯二酚甲醛树脂
	6.10 6.41	1640 1560	聚酰胺
3000～2800 (3.33～3.57)μm	6.80 13.9	1470 720	聚乙烯，合成蜡
	5.75	1740	乙烯乙酸乙烯酯共聚物
	8.07	1240	乙烯芳香酸酯共聚物
	5.75 6.80 (或8.62)	1740 1470 (或1160)	乙烯和酯类共聚物
	6.80 7.25	1470 1380	聚丙烯、乙丙橡胶、聚丁烯、聚异乙烯、聚萜、氯磺化聚乙烯

第一强吸收	第二、三强吸收		聚合物
σ/cm⁻¹	λ/μm	σ/cm⁻¹	
3000～2800 (3.33～3.57)μm	10.31,10.99 10.1或6.90	969,910 990或1450	聚丁二烯
	14.18,12.82 (或10.36)	705,780 (或965)	乙烯基甲苯，丁二烯共聚物
	7.00 7.30	1430 1370	聚异戊二烯
	6.9,13.24 (14.29或10.36)	1450,755 (700或965)	聚苯乙烯，苯乙烯丁二烯共聚物
	6.80 5.88 (或6.41)	1470 1700 (或1560)	乙烯，丙烯酸盐共聚物
	6.60 12.27	1515 815	聚对甲基苯乙烯
	6.60 12.00	1515 833	聚对异丙基苯乙烯
	6.02 7.00 (或8.97)	1660 1430 (或1115)	聚2-氯丁二烯
	6.90 7.93	1450 1260	氯化聚乙烯(无规氯化)
	12.70 13.16	787 760	氯化聚乙烯
	5.75 8.20	1740 1220	长链脂肪酸酯改性的聚氨酯
	6.10 6.41	1640 1560	长链脂肪族二元酸与乙二胺缩合物
	6.67 8.26	1500 1210	酚醛树脂
	5.75 7.81	1740 1280	醇酸树脂

续表

第一强吸收 σ/cm⁻¹	第二、三强吸收 λ/μm	 σ/cm⁻¹	聚合物
2350～2200 (4.25～4.55)μm	8.20 (或6.53) (或7.00)	1220 (或1530) (或1430)	聚异氰酸酯或聚氨酯
1800～1750 (5.56～5.71)μm	5.80 8.33	1725 1200	乙烯马来酸酐共聚物
	10.90 9.22	917 1085	甲基乙烯基醚马来酸酐共聚物
	14.3, 10.87 (或6.90) (或8.20)	700, 920 (或1450) (或1220)	苯乙烯马来酸酐共聚物
1750～1700 (5.71～5.88)μm	2.94～3.33 8.62	3400～3000 1160	聚丙烯酸
	8.62～8.73 8.40 (或8.0)	1160～1145 1190 (或1250)	聚甲基丙烯酸酯,聚丙烯酸酯
	8.62 3.33～3.57	1160 3000～2800	聚丙烯酸高级烷酯(≥丁酯)丙烯酰胺丙烯酸共聚物
	8.00 9.01	1250 1110	聚α-氯代丙烯酸甲酯
	8.51 9.30	1175 1075	聚丙酸乙烯酯
	8.00 7.25	1250 1380	聚乙酸乙烯酯
	8.0～8.1 8.55 (或9.52)	1250～1235 1170 (或1050)	纤维素酯
	8.51 8.70	1175 1150	聚氨酯
	7.86 8.89	1272 1125	邻苯二甲酸酯类聚合物
	8.59～8.00 8.70～9.18 (或13.79)	1265～1250 1150～1090 (或725)	聚对苯二甲酸乙二醇酯及共聚物
	7.69 8.06	1300 1240	间苯二甲酸聚酯
	7.35 9.01	1360 1110	聚酰亚胺
	7.25 13.98	1380 715	聚*N*-乙烯基邻苯二甲酰亚胺
	8.00 6.90	1250 1450	聚*N*-乙烯基-5-甲基-2-噁唑烷二酮
	8.55 6.01	1170 1665	乙烯吡咯烷酮丙烯酸乙酯共聚物
1700～1600 (5.88～6.25)μm	7.69 7.15	1300 1400	聚乙烯吡咯烷酮
	6.49 9.80	1540 1020	脲醛树脂
	3.03 6.49	3300 1540	脲、硫脲甲醛树脂
	7.25 11.90	1380 840	硝酸纤维素酯
	6.31 8.89 (或2.94)	1585 1125 (或3400)	聚丙烯酰胺
	6.31 8.30 (或2.99)	1585 1205 (或3344)	聚甲基丙烯酰胺

第一强吸收 σ/cm⁻¹	第二、三强吸收 λ/μm	 σ/cm⁻¹	聚合物
1700～1600 (5.88～6.25)μm	3.00 6.49	3330 1540	聚酰胺
	6.60 12.98 (或3.03)	1515 770 (或3300)	芳香族聚酰胺
1600～1500 (6.25～6.67)μm	8.48～10.2 2.95	1180～980 3390	羧甲基纤维素
	6.67 7.25	1500 1380	三聚氰胺甲醛树脂
	6.10 3.33～3.57	1640 3000～2800	聚酰胺
	8.00 12.05	1250 830	环氧树脂
	7.00 5.95	1430 1680	丙烯酸类聚合物
	7.09 3.03	1410 3300	聚丙烯酸钠
1500～1350 (6.67～7.41)μm	8.06 12.12	1240 825	环氧树脂
	6.25 11.90	1600 840	聚(2-甲基-5-乙烯基)吡啶
	8.20 3.03 (或3.33～3.57)	1220 3300 (或3000～2800)	酚醛树脂
	3.33～3.57 10.42	3000～2800 960	丁二烯丙腈共聚物
	7.30 3.33～3.57	1370 3000～2800	聚丙烯
	3.33～3.57 6.02 (或9.01)	3000～2800 1660 (或1110)	聚氯丁二烯
	8.00 7.61	1250 1315	氯乙烯偏二氯乙烯共聚物
	8.40 8.00	1190 1250	聚硫橡胶
	5.80 6.41	1725 1560	三聚氰胺丙烯酸树脂
1350～1200 (7.41～8.33)μm	5.80 8.85	1725 1130	醇酸树脂
	6.06 11.90	1650 840	硝酸纤维素酯
	6.58 12.05	1520 830	环氧树脂
	5.78 9.90	1730 1010	聚对苯二甲酸乙二醇酯
	8.55 13.33～14.29	1170 750～700	聚四氟乙烯
	6.67 6.85 (或3.03)	1500 1460 (或3300)	酚醛树脂
	8.59 8.33	1165 1200	聚碳酸酯
	5.71 6.45	1750 1550	聚氨酯
	5.80 7.25	1725 1380	聚乙酸乙烯酯
	5.75 5.95	1740 1680	乙烯吡咯烷酮乙酸乙烯酯共聚物

续表

第一强吸收	第二、三强吸收		聚合物
σ/cm^{-1}	λ/μm	σ/cm^{-1}	
1350～1200 (7.41～8.33) μm	5.75 6.95	1740 1440	氯乙烯醋酸乙烯酯共聚物
	5.75 3.03	1740 3300	聚乙烯醇(部分水解的聚醋酸乙烯酯)
	6.95 7.46	1440 1340	聚氯乙烯
	7.00 14.30	1430 700	氯化聚氯乙烯
	5.75 9.52	1740 1050	醋酸纤维素酯
1200～1150 (8.33～8.7) μm	7.09 11.30	1410 885	聚偏二氟乙烯
	7.25 11.24	1380 890	四氟乙烯,偏二氟乙烯共聚物
	10.20 13.33～ 13.90	980 750 ～720	四氟乙烯六氟丙烯共聚物
	8.85 10.30	1130 970	聚三氟氯乙烯
	8.93 10.36	1120 965	kel-F
	7.25 7.04	1380 1420	三氟氯乙烯,偏二氟乙烯共聚物
	8.13 8.59	1230 1165	聚碳酸酯
	7.09 8.03	1410 1245	聚硫橡胶
	7.25 11.30	1380 885	六氟丙烯偏二氟乙烯共聚物
1150～1000 (8.7～10)μm	8.77 9.80	1140 1020	聚氯乙烯
	8.20 9.80	1220 1020	硅氟橡胶
	9.35 9.01	1070 1110	聚硫橡胶
	3.33～3.57 8.40	3000～2800 1190	聚乙烯甲基醚
	3.33～3.57 7.25	3000～2800 1380	聚乙烯乙基醚、聚乙烯正丁基醚、聚乙烯异丁基醚、聚丙二醇
	9.43 8.85	1060 1130	聚乙烯环甲醚
	3.33～3.57 10.00	3000～2800 1000	聚乙烯环丁醚
	3.33～3.57 6.85	3000～2800 1460	聚乙二醇
	3.33～3.57 4.35～4.55	3000～2800 2300～2200	聚醚型聚氨酯
	3.33～3.57 6.49	8000～2800 1540	聚氧化乙撑与1,5萘二异氰酸缩合物
	3.33～3.57 11.83	3000～2800 845	聚醚型环氧树脂
	8.13 7.25	1230 1380	聚乙烯环乙醚
	8.20 6.67	1220 1500	聚醚型环氧树脂
	3.33～3.57 13.42	3000～2800 745	聚环氧氯丙烷
	2.94 3.33～3.57	3400 3000～2800	甲基纤维素,羟乙基纤维素
1150～1000 (8.7～10)μm	3.33～3.57 7.30	3000～2800 1370	乙基纤维素、乙基羟乙基纤维素、羟丙基甲基纤维素、天然纤维素、羟甲基羟乙基纤维素钠盐、羧甲基纤维素钠盐
	9.80 12.5	1020 800	甲基硅橡胶
	13.16 7.94	760 1260	甲基硅树脂
	7.94 12.5	1260 800	甲基苯基硅树脂
	11.24 11.90	890 840	甲基氢硅油
	3.33～3.57 13.51	3000～2800 740	硅烷醇酸树脂
	2.94 8.47	3400 1180	聚丙烯醛
	9.35 7.04	1070 1420	聚偏二氯乙烯
	7.00 8.00 (或14.92)	1430 1250 (或670)	偏二氯乙烯,氯乙烯共聚物
	7.00 13.33	1430 750	偏二氯乙烯丙烯腈共聚物
	5.75 8.55	1740 1170	偏二氯乙烯丙烯酸酯共聚物
	3.33～3.57 8.00	3000～2800 1250	氯乙烯异丁基醚共聚物
	12.66 8.89	790 1125	糠醇糠醛树脂
1000～900	3.33～3.57 6.85 (或10.1)	3000～2800 1460 (或990)	聚丁二烯 丁腈橡胶
	8.93 8.40	1120 1190	聚三氟氯乙烯
	10.99 9.09	910 1100	聚甲醛
900～670 (11.11～ 14.92)μm	3.33～3.57 6.95	3000～2800 1440	顺1,4-聚丁二烯
	9.8 9.17	1020 1090	甲基硅橡胶
	6.25 13.33	1600 750	2-乙烯基吡啶橡胶
	13.79 6.85	725 1460	聚*N*-乙烯基咔唑
	13.16 6.90	760 1450	聚苯乙烯
	3.33～3.57 14.29	3000～2800 700	聚α-甲基苯乙烯
	13.16 6.85	760 1460	苯乙烯丙烯共聚物、ABS树脂
	3.33～3.57 13.16	3000～2800 760	苯乙烯丁二烯共聚物
	5.75 6.85	1740 1460	苯乙烯丙烯酸酯共聚物
	6.02 6.85	1660 1460	苯乙烯乙烯吡咯烷酮共聚物
	10.75 10.42	930 960	苯乙烯马来酸酐共聚物
	3.33～3.57 5.80	3000～2800 1725	苯乙烯醇酸树脂共聚物
	8.27 6.95	1210 1440	氯化聚丙烯

续表

第一强吸收	第二、三强吸收		聚合物	第一强吸收	第二、三强吸收		聚合物
σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$	σ/cm^{-1}		σ/cm^{-1}	$\lambda/\mu m$	σ/cm^{-1}	
900～670 (11.11～14.92)μm	8.27 7.88	1210 1270	氯化天然橡胶	900～670 (11.11～14.92)	3.33～3.57 6.80	3000～2800 1470	低压聚乙烯
	8.00 7.00	1250 1430	氯化聚氯乙烯		3.33～3.57 6.75	3000～2800 1480	库马龙-茚树脂

上述的系统鉴定是按第一强谱带来分类的。大多数饱和碳氢化合物的第一吸收带在(3000～2900)cm^{-1}，一些醇类和酚类第一吸收带在(3500～3200)cm^{-1}。这些区域的谱带容易受KBr压片的散射，石蜡糊本身的吸收。水的吸收等外界因素的影响，因此，可以按它的第二强谱带来分类，共分为6类。其具体分类见表20-17～表20-22[3]。

表20-17～表20-22分别为每个区所包含的聚合物。表中前面一列是最强谱带的位置，后面一列是能够反映出这个聚合物存在的特征谱带位置。最特征谱带下面划“—”，以示特别注意。对于双峰，在其波数位置下面用“ ⌟ ”表示。

表 20-17　Ⅰ区(1800～1700cm^{-1})的聚合物

聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动		聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动	
	最强谱带	特征谱带		最强谱带	特征谱带
聚乙酸乙烯酯	1740 $\nu_{(C=O)}$	1240　1020 $\nu_{(C-O)}$　1375 $\delta_{S(CH_3)}$	以己二酸为基的醇酸树脂	1735 $\nu_{(C=O)}$	1165　1140 $\nu_{(C-O)}$　1250　1080 一系列小峰
聚丙烯酸甲酯	1730 $\nu_{(C=O)}$	1170　1200　1260 $\nu_{(C-O)}$	以H.E.T.酸为基的醇酸树脂	1740 $\nu_{(C=O)}$	1605　1335 $\nu_{(C-O)}$　1190　1110 $\nu_{(C-O)}$
聚丙烯酸丁酯	1730 $\nu_{(C=O)}$	1165 1245 $\nu_{(C-O)}$　940　960 丁酯特征	植物油	1740 $\nu_{(C=O)}$	1165 $\nu_{(C-O)}$　1235　1100 在主峰两侧　965～998 $\gamma_{(=CH)}$
聚甲基丙烯酸甲酯	1730 $\nu_{(C=O)}$	1150　1190 $\nu_{(C-O)}$　1240　1268 一对双峰	松香酯	1730 $\nu_{(C=O)}$	1240　1175 $\nu_{(C-O)}$　1130　1100 双峰
聚甲基丙烯酸乙酯	1725 $\nu_{(C=O)}$	1150　1180　1240　1268 同上　1022 乙酯特征	聚酯型聚氨酯	1735 $\nu_{(C=O)}$	1540 $\delta_{(N-H)}+\nu_{(C-N)}$　其他特征同聚酯
聚甲基丙烯酸丁酯	1730 $\nu_{(C=O)}$	1150　1180　1240　1268 同上　950　970 丁酯特征	聚酰亚胺	1725 $\nu_{(C=O)}$	1780 $\nu_{(C=O)}$
聚邻苯二甲酸乙二醇酯	1740 $\nu_{(C=O)}$	1280　1125 $\nu_{(C-O)}$　1070 $\delta_{(C-H)}$　745　710 $\gamma_{(C-H)}$	聚丙烯酸	1700 $\nu_{(C=O)}$	1170　1250 $\nu_{(C-O)}$
聚对苯二甲酸乙二醇酯	1730 $\nu_{(C=O)}$	1265　1100 $\nu_{(C-O)}$　1020　730 $\gamma_{(C-H)}$	聚酮	1710 $\nu_{(C=O)}$	1450 $\delta_{(CH_2)}$
聚间苯二甲酸乙二醇酯	1730 $\nu_{(C=O)}$	1230　1300 $\nu_{(C-O)}$　730 $\gamma_{(C-H)}$	聚马来酸酐	1785 $\nu_{(C=O)}$	1850 $\nu_{(C=O)}$　1240　950 $\nu_{(C-O)}$

表 20-18　Ⅱ区(1700～1500cm^{-1})的聚合物

聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动		聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动	
	最强谱带	特征谱带		最强谱带	特征谱带
聚酰胺	1640 $\nu_{(C=O)}$	1550 $\nu_{(C-N)}+\delta_{(N-H)}$　3090 上面倍频　3300 $\nu_{(N-H)}$	硫脲-甲醛树脂	1640 $\nu_{(C=O)}$	3230　1350　1290　1010
聚丙烯酰胺	1650　1600 $\nu_{(C=O)}\delta_{(NH_2)}$	3300　3175　1020 $\nu_{(NH_2)}$	三聚氰胺-甲醛树脂	1555　1510 $\nu_{(C=N)}$	1370　815 环振动　1020
聚乙烯吡咯烷酮	1665 $\nu_{(C=O)}$	1280　1410	明胶	1640 $\nu_{(C=O)}$	1530　3300
聚6-脲	1625　1565 $\nu_{(C=O)}\delta_{(NH)}$	1250 $\nu_{(C-N)}+\delta_{(N-H)}$	松香酸的钠盐	1543 $\nu_{aS(C=O)}$	1400 $\nu_{S(C=O)}$　1670 $\nu_{(C=C)}$
脲-甲醛树脂	1640 $\nu_{(C=O)}$	1540　1250 $\nu_{(C-N)}+\delta_{(N-H)}$	聚丙烯酸钠盐	1575 $\nu_{aS(C=O)}$	1410 $\nu_{S(C=O)}$

表 20-19 Ⅲ区(1500~1300cm⁻¹)的聚合物

聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动		聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动	
	最强谱带	特征谱带		最强谱带	特征谱带
聚乙烯	1470 $\delta_{(CH_2)}$	731 720 $\gamma_{(CH_2)}$	天然橡胶	1450 $\delta_{(CH_2)}$	835 $\gamma_{(CH)}$
等规聚丙烯	1376 $\delta_{S(CH_3)}$	1166 998 841 1304 与结晶有关	氯丁橡胶	1440 $\delta_{(CH_2)}$	1670 $\nu_{(C=C)}$ 1100 $\nu_{(C-C)}$ 820 $\gamma_{(C-H)}$
聚异丁烯	1365 1385 $\delta_{S(CH_3)}$	1230 $\nu_{(C-C)}$	氯磺化聚乙烯	1475 $\delta_{(CH_2)}$	1250 $\delta_{(C-H)}$ 1160 1316 $\nu_{(S=O)}$
等规聚1-丁烯	1465 $\delta_{(CH_2)}$	760 $\gamma_{(CH_2)}$	石油烷烃树脂	1475 $\delta_{(CH_2)}$	750 700 1700 强度变化很大 $\nu_{(C=O)}$
萜烯树脂	1465 $\delta_{(CH_2)}$	1365 1385 $\delta_{S(CH_3)}$ 3400 1700	聚丙烯腈	1440 $\delta_{(CH_2)}$	2240 $\nu_{(C\equiv N)}$

表 20-20 Ⅳ区(1300~1200cm⁻¹)的聚合物

聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动		聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动	
	最强谱带	特征谱带		最强谱带	特征谱带
双酚-A型环氧树脂	1250 $\nu_{(C-O)}$	1510 1604 苯环 2980 $\nu_{aS(CH_3)}$ 830 $\gamma_{(CH)}$ 1300 1188	聚氯乙烯	1250 $\delta_{(C-H)}$	1420 $\delta_{(CH_2)}$ 1330 $\delta_{(CH)}+\gamma_{(CH_2)}$ 600—700 $\nu_{(C-Cl)}$
酚醛树脂	1240 $\nu_{(C-O)}$	1510 1610 1590 苯环 815 $\gamma_{(CH)}$ 3300	聚苯醚	1240 $\nu_{(C-O)}$	1600 1500 1160 1020
双酚-A型聚碳酸酯	1240 $\nu_{(C-O)}$	1780 $\nu_{(C=O)}$ 1190 1165 830 $\gamma_{(CH)}$	硝化纤维素	1285 $\nu_{(N-O)}$	1660 845 硝酸酯特征 1075
二乙二醇双烯丙基聚碳酸酯	1250 $\nu_{(C-O)}$	1780 $\nu_{(C=O)}$ 790	三乙酸纤维素	1240 $\nu_{(C-O)}$	1740 1380 乙酸酯特征 1050
双酚-A型聚砜	1250 $\nu_{(C-O)}$	1310 1160 $\nu_{(S=O)}$ 1110 830 $\gamma_{(CH)}$			

表 20-21 Ⅴ区(1200~1000cm⁻¹)的聚合物

聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动		聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动	
	最强谱带	特征谱带		最强谱带	特征谱带
聚乙烯基醚类	1100 $\nu_{(C-O)}$	只有碳氢吸收	乙烯-SO_2共聚物(聚砜)	1110 $\nu_{(S=O)}$	1300 785 聚砜特征
聚氧乙烯	1100 $\nu_{(C-O)}$	945	LP型聚硫	1070 $\nu_{(C-O)}$	1030 1112 1152 1195 $\nu_{(-O-C-O-)}$
聚乙烯醇缩甲醛	1020 $\nu_{(C-O)}$	1060 1130 1175 1240 缩甲醛特征	A型聚硫	1190	1410 1250 1105
聚乙烯醇缩乙醛	1140 $\nu_{(C-O)}$	940 1340 缩乙醛特征	甲基有机硅树脂	1100 1020 $\nu_{aS(Si-O-Si)}$	1260 $\delta_{S(CH_3)}$ 800 $\nu_{aS(C-Si-C)}$
聚乙烯醇缩丁醛	1124 $\nu_{(C-O)}$	995	甲基苯基硅树脂	1100 1020 同上	1260 $\delta_{S(CH_3)}$ 3066 3030 1440 苯环特征
纤维素	1050 $\nu_{(C-OH)}$	1158 1109 1025 1000 970 在主峰两侧的一系列突起	聚偏氯乙烯	1070 1045 $\nu_{(C-C)}\nu_{(C-C)}+2\times\nu_{aS(C-Cl)}$	1405 $\delta_{(CH_2)}$
纤维素醚类	1100 $\nu_{(C-O)}$	1050 3400 残存OH吸收	聚四氟乙烯	1250~1100 $\nu_{(C-F)}$	770 638 非晶带 554 晶带
一乙酸纤维素	1050 $\nu_{(C-O)}$	1740 1240 1380 乙酸酯特征	聚三氟氯乙烯	1198 1130 $\nu_{(C-F)}$	970 $\nu_{(C-Cl)}$ 1285 晶带 657 非晶带
乙酸丁酸纤维素	1075 $\nu_{(C-O)}$	1150 920 750 丁酸酯特征	聚偏氟乙烯	1175 $\nu_{(C-F)}$	875 1395 1070
聚醚型聚氨酯	1110 $\nu_{(C-O)}$	1540 $\delta_{(N-H)}$ 1690 1730 $\nu_{(C=O)}$			

表 20-22　Ⅵ区(1000～600cm^{-1})的聚合物

聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动		聚合物名称	谱带位置(σ/cm^{-1})及对应基团振动	
	最强谱带	特征谱带		最强谱带	特征谱带
聚苯乙烯	760　700 单取代苯特征	3000　3022　3060　3080　3100 五条尖锐谱带	顺式1∶4聚丁二烯	738 $\gamma_{(-C-H)}$	1653 $\nu_{(C=C)}$
聚茚	750 $\gamma_{(C-H)}$	1250～850 很多弱的尖锐谱带	聚甲醛	935　900 $\nu_{(C-O)}$	1100　1240
聚对甲基苯乙烯	815 $\gamma_{(C-H)}$	720	(高)氯化聚乙烯	670 $\nu_{(C-Cl)}$	760　790　$\nu_{(C-Cl)}$ 1266　$\delta_{(C-H)}$
1∶2聚丁二烯	909 $\gamma_{(-CH_2)}$	993　$\gamma_{(-CH_2)}$ 1650　700　$\nu_{(C=C)}$	氯化橡胶	790 $\nu_{(C-Cl)}$	760　736　$\nu_{(C-Cl)}$ 1280　1250　$\delta_{(C-H)}$
反式1∶4聚丁二烯	967 $\gamma_{(-C-H)}$	1660 $\nu_{(C=C)}$			

红外光谱法鉴定橡胶已制订了国家标准(GB7764—84)。该标准利用红外分光光度计对橡胶裂解物，橡胶薄膜和200℃降解物进行鉴定。表20-23汇总了橡胶裂解的红外光谱特征；表20-24汇总了橡胶薄膜的红外光谱特征。

表 20-23　橡胶裂解物的红外光谱特征[8]

名　称	峰强度	σ/cm^{-1}	有关官能团
异戊二烯橡胶	很强	885	亚乙基 $>C=CH_2$
	强	1370	$-CH_3$
	中	800	芳香族取代物
	中	1640	脂肪族 $-CH=CH-$
	肩峰	909	$-CH=CH_2$
丁苯橡胶	很强	699	芳香族取代物
	强	775	芳香族取代物
	强	909	$-CH=CH_2$
	次强	990	$-CH=CH_2$
	中	1490	芳香族 $-CH=CH-$
	中	962	反式 $-CH=CH-$
	中	1590	芳香族 $-CH=CH-$
丁腈橡胶	中强	2220	$-C\equiv N$
	中	962	反式 $-CH=CH-$
	中	1610	脂肪族 $-CH=CH-$
	中	1590	芳香族 $-CH=CH-$
	中	909	$-CH=CH_2$
氯丁橡胶	较强	885	亚乙基 $>C=CH_2$
	较强	699	芳香族取代物
	中	820	γ(CH)
	弱，有时消失	747	
	弱，有时消失	769	芳香族取代物
乙丙橡胶	强	1370	$-CH_3$
	强	909	$-CH=CH_2$
	强	885	
	中	962	反式 $-CH=CH-$
	中	725	$-CH=CH_2$
聚丁二烯橡胶	强	909	$-CH=CH_2$
	强	962	反式 $-CH=CH-$

名　称	峰强度	σ/cm^{-1}	有关官能团
聚丁二烯橡胶	中	990	$-CH=CH_2$
	弱	813	
	弱	695	
聚乙烯氯磺化橡胶	强	909	$-CH=CH_2$
	中	962	反式 $-CH=CH-$
	中	990	$-CH=CH_2$
	中	741	$-SO_2Cl$
	弱	813	$-SO_2Cl$
	弱	720	
	弱	695	
聚醚型聚氨酯橡胶	最强	1100	R—O—R′
	中	1720	$RO>C=O$
丁基橡胶	强	1370	亚异丙基 $>C(CH_3)_2$
	强	1390	亚异丙基 $>C(CH_3)_2$
	强	885	亚乙基 $>C=CH_2$
	双峰，有时消失　中	1250～1220	$>C(CH_3)_2$
	很弱，有时消失	725	反式 $-CH=CH-$
聚酯型聚氨酯橡胶	强	1720	$RO>C=O$
	强	1300～1100	C—O
	中	1530	N—H
甲苯乙烯基硅橡胶	特强	1109～1018	Si—O
	强	800	$-Si(CH_3)_2$
	强	1258	$Si-CH_2$

续表

名　称	峰强度	σ/cm⁻¹	有关官能团	名　称	峰强度	σ/cm⁻¹	有关官能团
氟橡胶23	极强	1200～1100	C—F	氟橡胶-26	中	1700	
	中	1700			中	880	
	中	950			中	720	
	中	720		氟橡胶-246	极强	1200～1100	C—F
	弱	1770			中	880	
氟橡胶-26	极强	1200～1100	C—F		中	720	

表 20-24　橡胶薄膜的红外光谱特征[8]

名　称	峰强度	σ/cm^{-1}	有关官能团
异戊二烯橡胶	强	833	
	强	1370	$—CH_3$
	中	1665	脂肪族 —CH═CH—
	弱	855	亚乙基 $>C═CH_2$
丁基橡胶	很强	1370	亚异丙基 $>C(CH_3)_2$
	很强	1390	亚异丙基 $>C(CH_3)_2$
	次强	1250～1220	$>C(CH_3)_2$
聚酯型聚氨酯橡胶	强	1720	RO—C═O
	强	1300～1100	C—O
	中	1530	N—H
丁苯橡胶	很强	699	芳香族取代物
	很强	962	反式 —CH═CH—
	强	758	芳香族取代物
	中	1490	芳香族 —CH═CH—
	中	1590	芳香族 —CH═CH—
丁腈橡胶	很强	962	反式 —CH═CH—
	中	2220	—C≡N
	中	917	$—CH═CH_2$
氯丁橡胶	强	1630	脂肪族 —CH═CH—
	强	820	C—Cl
	强	1110	C—C
	中	1300	

名　称	峰强度	σ/cm^{-1}	有关官能团
乙丙橡胶	强	1370	$—CH_3$
	中	722	$—CH—CH_2$
	中	1185	
聚丁二烯橡胶	很强	635	
	中	909	$—CH═CH_2$
	中	962	反式 —CH═CH—
	中	990	$—CH═CH_2$
氯磺化聚乙烯橡胶	中	1350	
	中	1160	
	中	1265	
	中	722	$—SO_2Cl$
聚醚型聚氨酯橡胶	最强	1100	R—O—R′
	中	1720	RO—C═O
天然橡胶(烟片)	强	833	
	强	1370	$—CH_3$
	中	1665	脂肪族 —CH═CH—
	弱	885	亚乙基 $>C═CH_2$
古塔波胶	强	848	
	强	1390	$—CH_3$
	中	1150	
	中	1665	脂肪族 —CH═CH—
	中	885	亚乙基 $>C═CH_2$

硫化橡胶200℃降解物的红外光谱特征：

裂解法会使橡胶分子发生键转移、环化、异构化、缩合等反应，导致橡胶分子结构发生较大变化。例如，聚丁二烯橡胶在波数为730cm^{-1}的顺式结构特征吸收峰，会因裂解而异构成波数为960cm^{-1}的反式结构特征吸收峰，因此，当聚丁二烯橡胶与其他丁二烯类橡胶并用时，往往不能被检出，如采用200℃不完全降解法，就可以解决类似问题，除对含有氟和硅元素的耐热性橡胶不适用之外，所有硫化橡胶采用200℃不完全降解法所得到的红外光谱与生橡胶制膜法所得到的红外光谱图基本一致。

橡胶或弹性体的谱图分类鉴定表见表20-25。表20-25中所用的各吸收频率的谱带解释见表20-26。图20-2～图20-48给出了常见橡胶的裂解、制膜和200℃降解的红外光谱[8]。

表 20-25 橡胶或弹性体的谱图分类鉴定表[1]

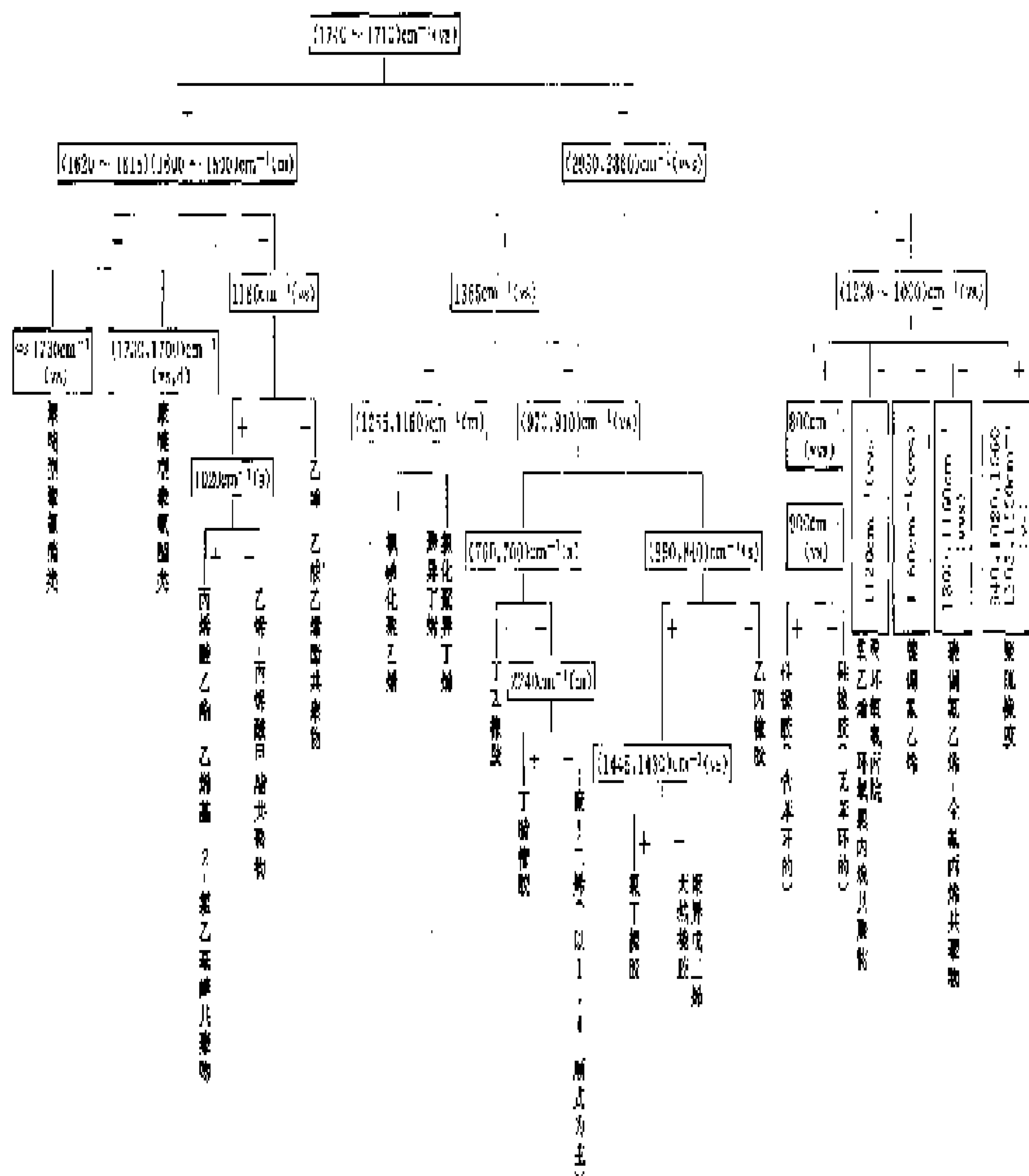


表 20-26　表20-25中所用的各吸收频率的谱带解释[3]

σ/cm⁻¹	λ/μm	谱　带　解　释
2930,2860	3.41,3.50	CH_2的伸缩振动
2240	4.46	C≡N 的伸缩振动
1740～1710	5.75～5.85	C=O 伸缩振动(酯基)
1700	5.88	C=O 伸缩振动
1620～1615,	6.17～6.19,	(苯环)的 C=C 伸缩振动
1600～1590	6.25～5.29	同上
1445,1430	6.92,7.00	C—H 变角振动,因邻近的碳原子有氯原子而位移到此
1365	7.33	$>C(CH_3)_2$ 的 CH_3变角振动
1255,1160	7.97,8.62	$—SO_2$ 的伸缩振动
1200～1000	8.33,10.0	—Si—O 伸缩振动；C—F 伸缩振动
		C O—C 伸缩振动；O—C—O 伸缩振动
1160	8.62	—C—C—O—C 伸缩振动
970,910	10.31,10.99	>C=C(H)(H) 的 CH 弯曲振动(反式和顺式)
900	11.11	(苯环)—Si—的伸缩振动
890,840	11.24,11.90	>C=C(R)(H) 的 CH 弯曲振动(反式和顺式)
760,700	13.16,14.29	(苯环)的 CH 面外振动(苯环上有一个取代基)

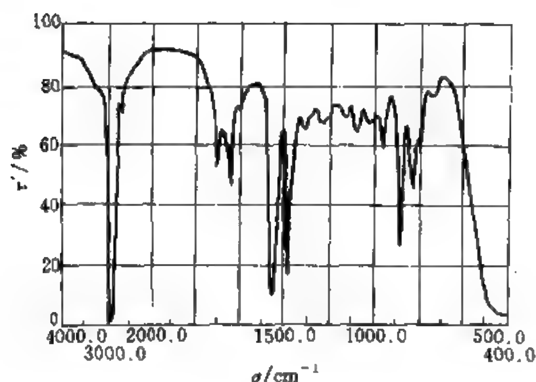


图 20-2　异戊二烯橡胶(生胶裂解)

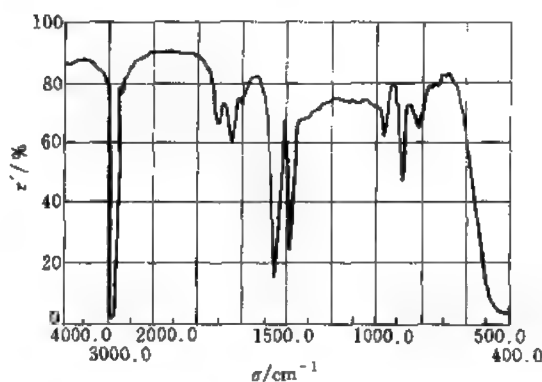


图 20-3　异戊二烯橡胶(硫化胶裂解)

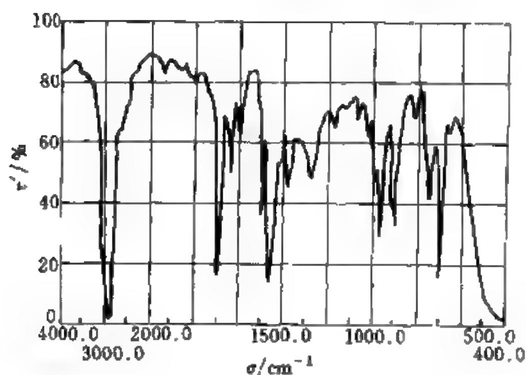


图 20-4　丁苯橡胶(生胶裂解)

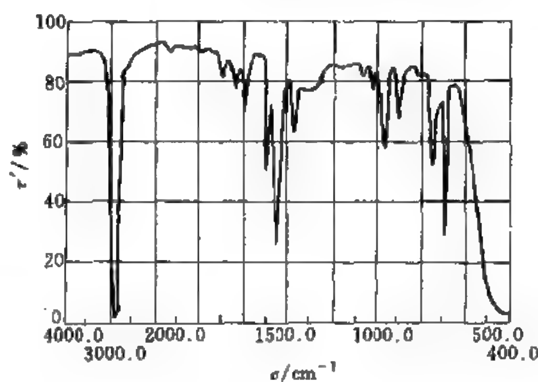


图 20-5　丁苯橡胶(硫化胶裂解)

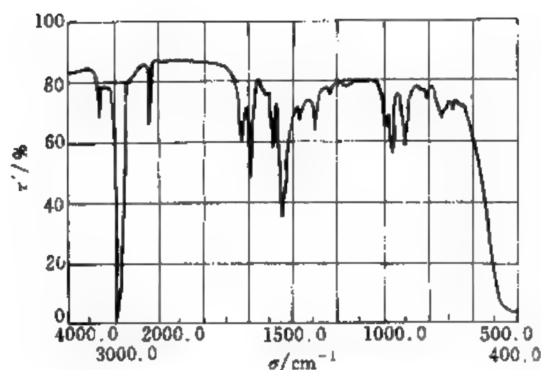


图 20-6 丁腈橡胶(生胶裂解)

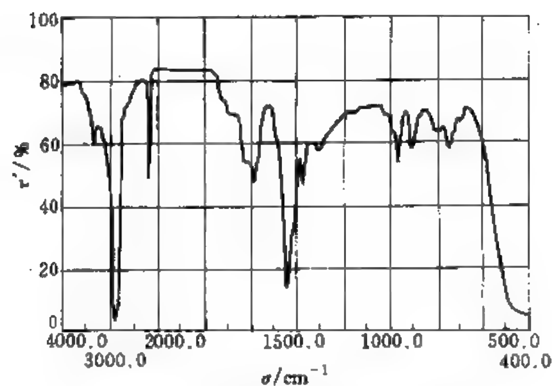


图 20-7 丁腈橡胶(硫化胶裂解)

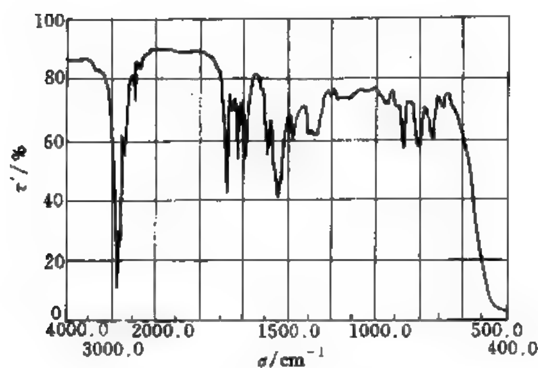


图 20-8 氯丁橡胶(生胶裂解)

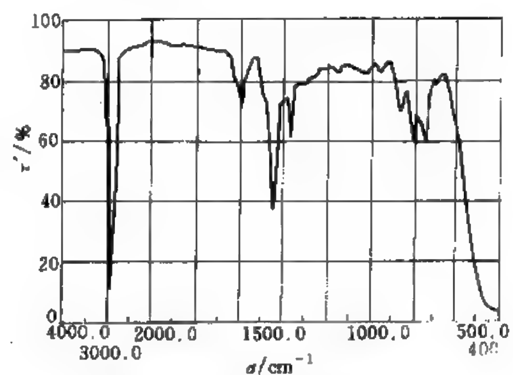


图 20-9 氯丁橡胶(硫化胶裂解)

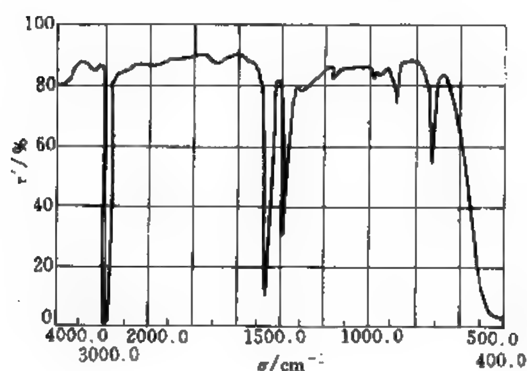


图 20-10 乙丙橡胶(生胶裂解)

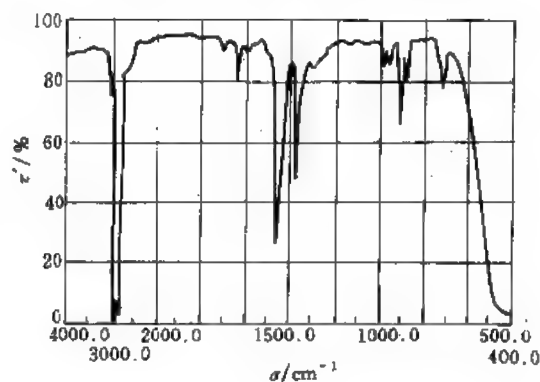


图 20-11 乙丙橡胶(硫化胶裂解)

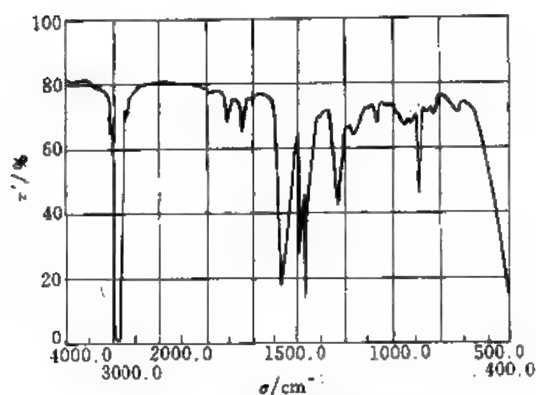


图 20-12 丁基橡胶(生胶裂解)

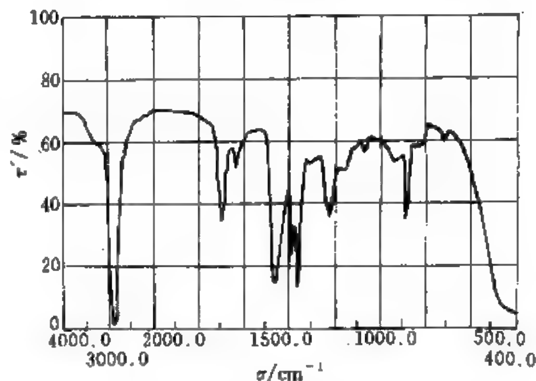


图 20-13 丁基橡胶(硫化胶裂解)

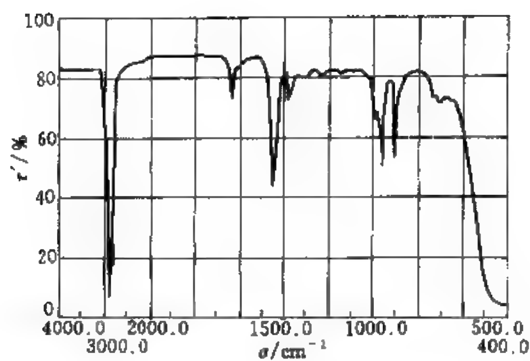


图 20-14 聚丁二烯橡胶(生胶裂解)

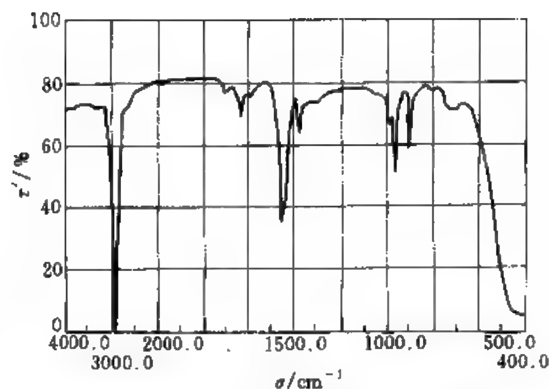


图 20-15 聚丁二烯橡胶(硫化胶裂解)

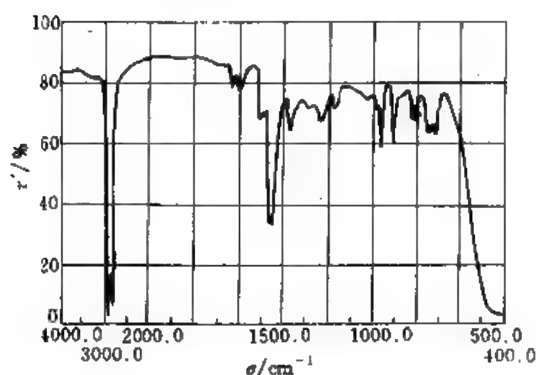


图 20-16 氯磺化聚乙烯橡胶(生胶裂解)

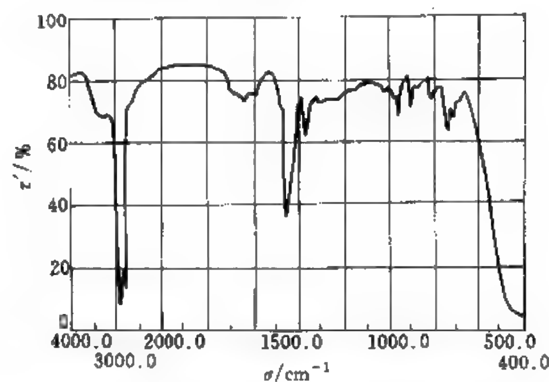


图 20-17 氯磺化聚乙烯橡胶(硫化胶裂解)

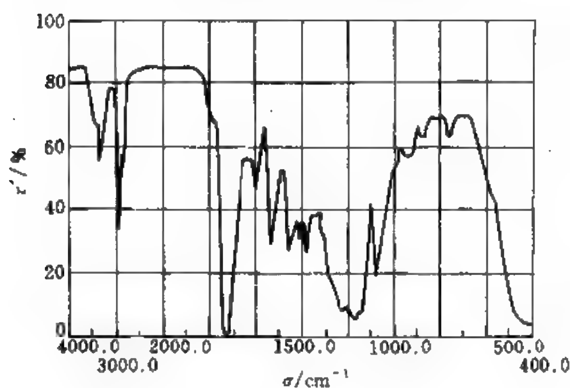


图 20-18 酯型聚氨酯橡胶(生胶裂解)

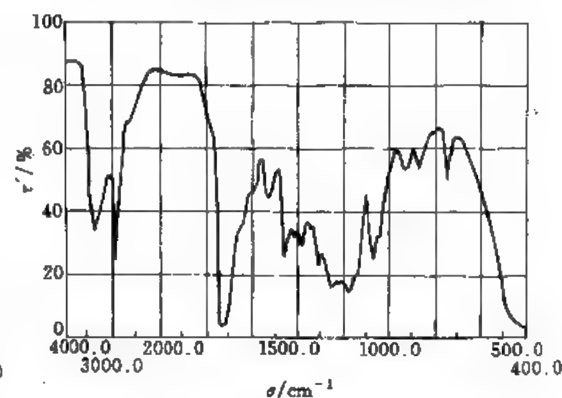


图 20-19 酯型聚氨酯橡胶(硫化胶裂解)

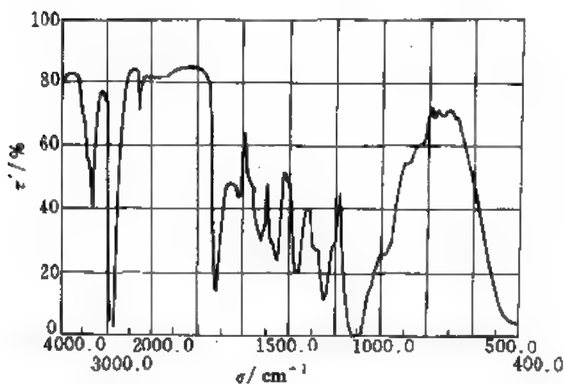


图 20-20 醚型聚氨酯橡胶(生胶裂解)

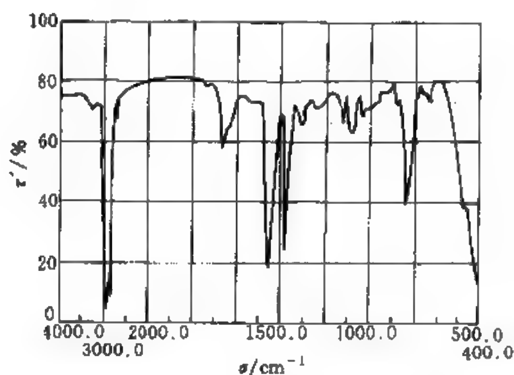


图 20-21 异戊二烯橡胶(生胶制膜)

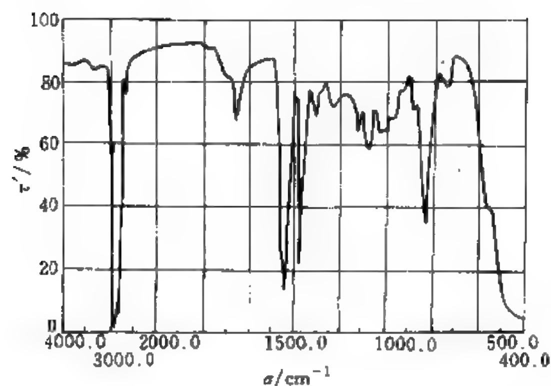


图 20-22 异戊二烯橡胶(硫化胶制膜)

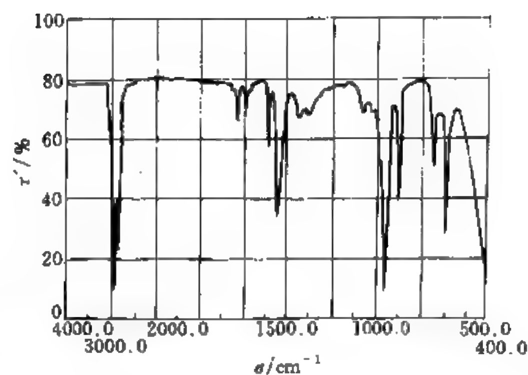


图 20-23 丁苯橡胶(生胶制膜)

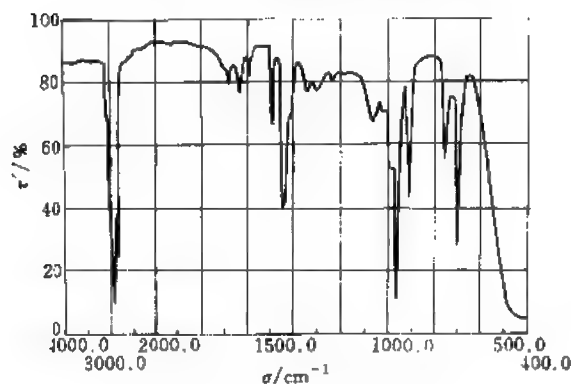


图 20-24 丁苯橡胶(硫化胶制膜)

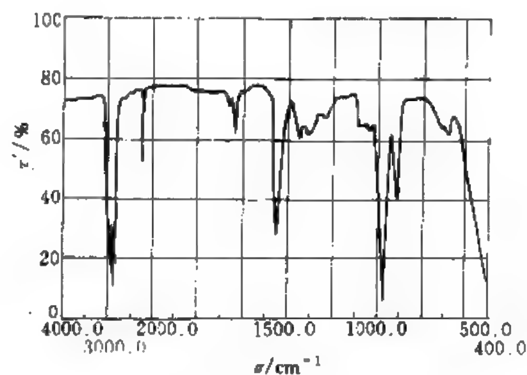


图 20-25 丁腈橡胶(生胶制膜)

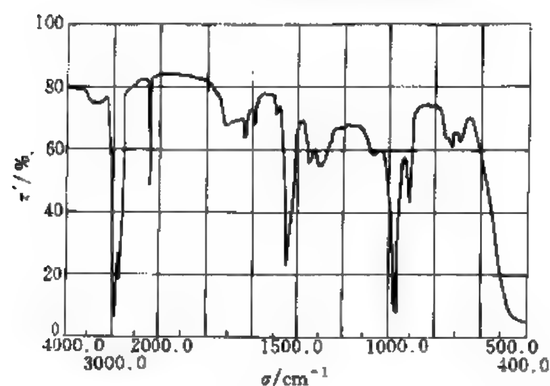


图 20-26 丁腈橡胶(硫化胶制膜)

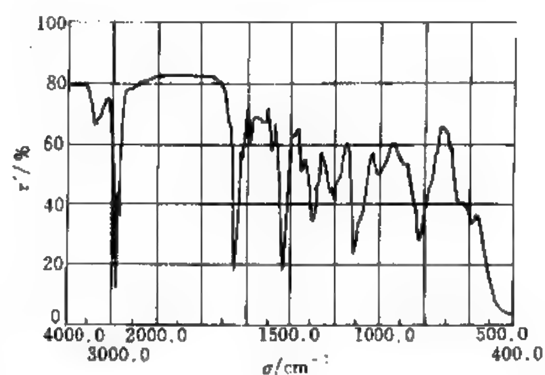


图 20-27 氯丁橡胶(生胶制膜)

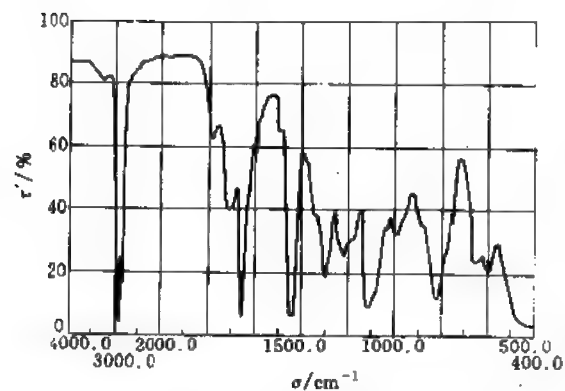


图 20-28 氯丁橡胶(硫化胶制膜)

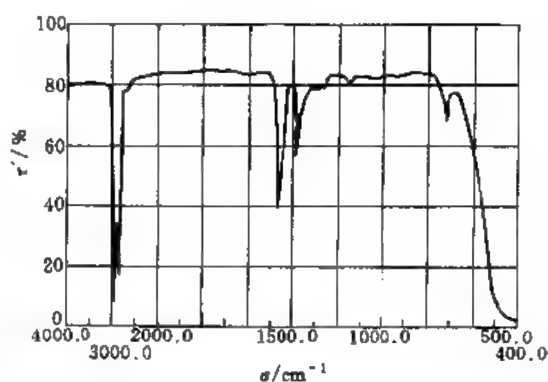


图 20-29 乙丙橡胶(生胶制膜)

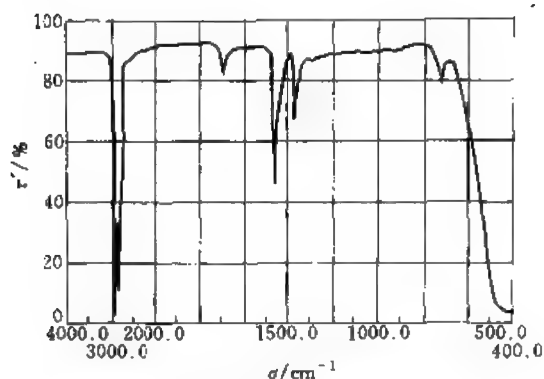


图 20-30 乙丙橡胶(硫化胶制膜)

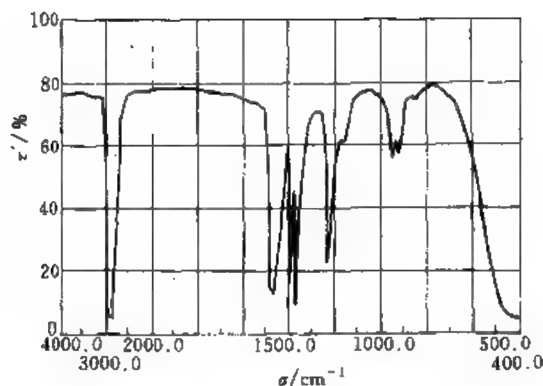


图 20-31 丁基橡胶(生胶制膜)

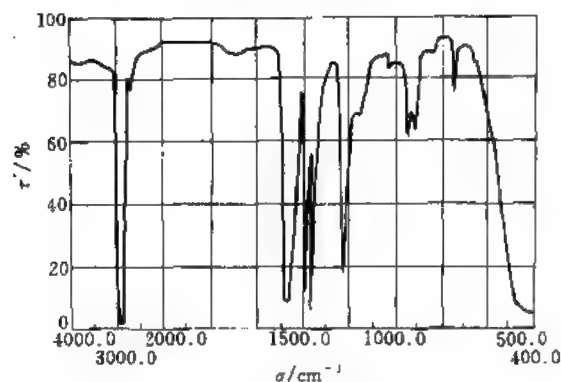


图 20-32 丁基橡胶(硫化胶制膜)

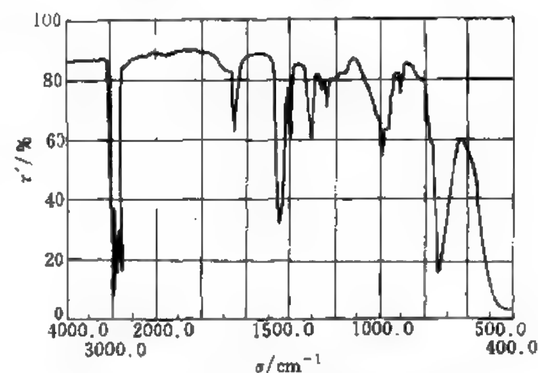


图 20-33 聚丁二烯橡胶(生胶制膜)

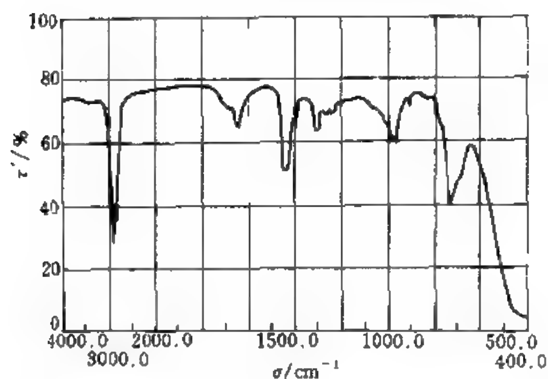


图 20-34 聚丁二烯橡胶(硫化胶制膜)

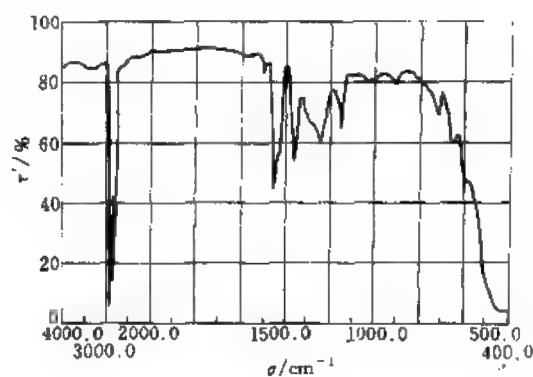


图 20-35 氯磺化聚乙烯橡胶(生胶制膜)

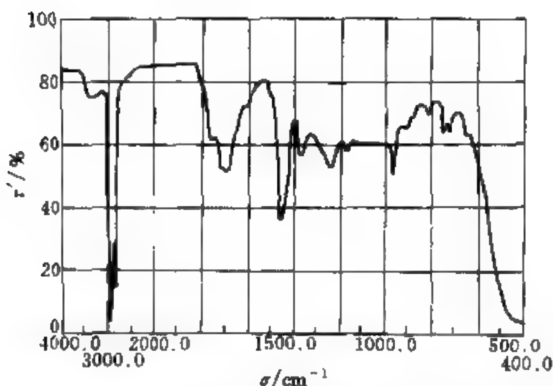


图 20-36 氯磺化聚乙烯橡胶(硫化胶制膜)

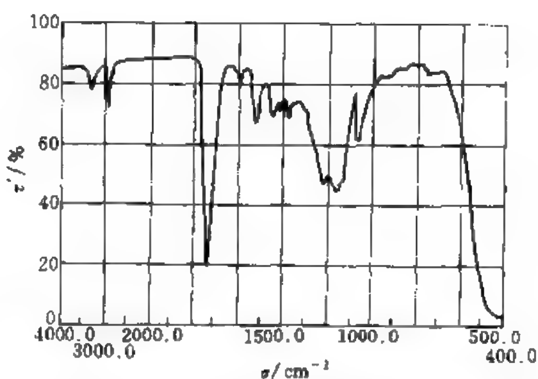


图 20-37 (酯型)聚氨酯橡胶(生胶制膜)

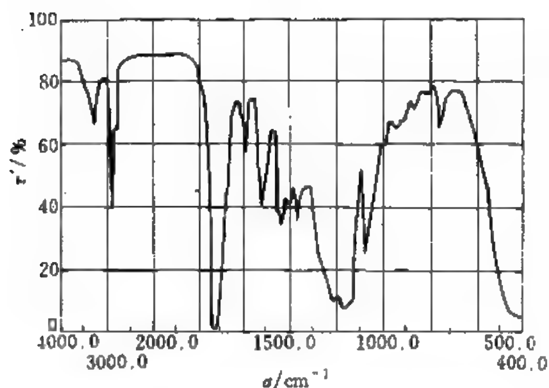


图 20-38 (酯型)聚氨酯橡胶(硫化胶制膜)

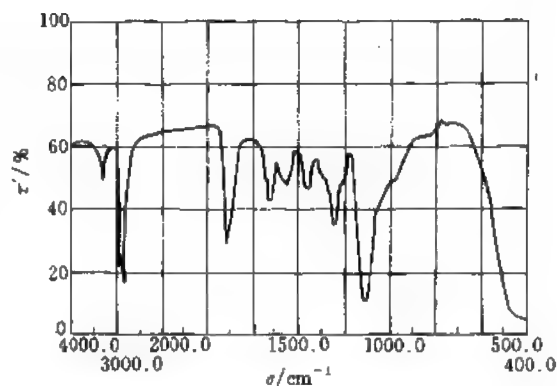


图 20-39 醚型聚氨酯橡胶(生胶制膜)

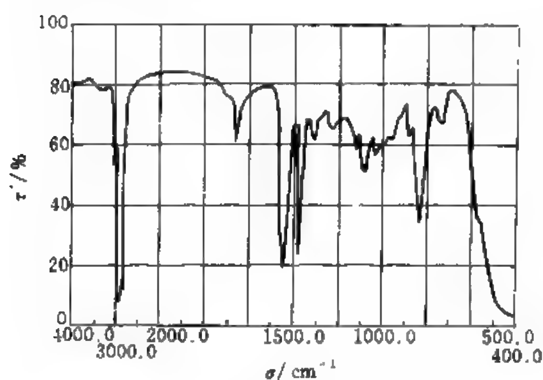


图 20-40 异戊二烯橡胶(200℃降解)

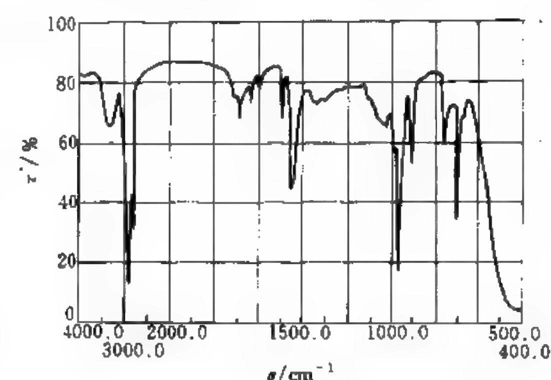


图 20-41 丁苯橡胶(200℃降解)

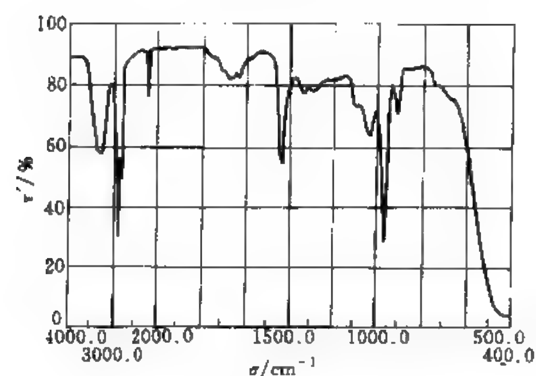


图 20-42 丁腈橡胶(200℃降解)

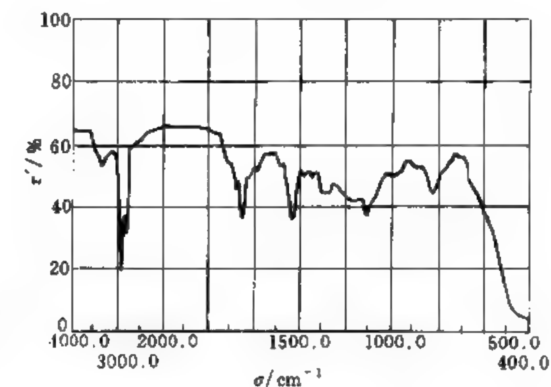


图 20-43 氯丁橡胶(200℃降解)

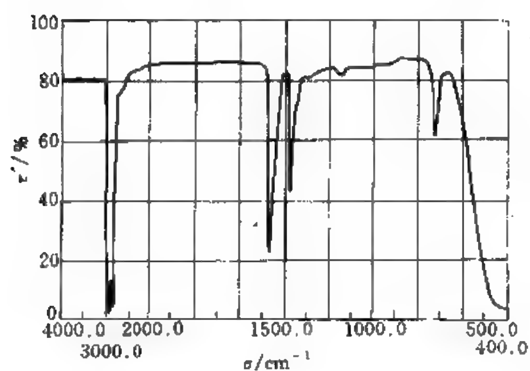


图 20-44 乙丙橡胶(200℃降解)

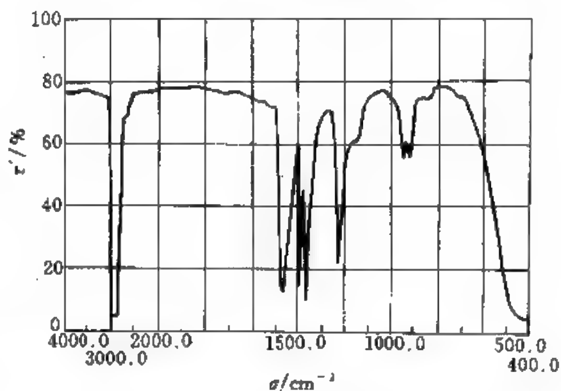


图 20-45 丁基橡胶(200℃降解)

表 20-27 纤维的光谱分类鉴定表

纤维样品

(1740～1715)cm⁻¹(vs)

- +：(1610,1580,1500)cm⁻¹(m-w)
  - +：Dacron, PES, Kodel
  - −：2240cm⁻¹(s)
    - +：1650cm⁻¹(vs)
      - +：Verel
      - −：Dynlon
    - −：乙酸纤维素
- −：(1670～1620,1550～1510)cm⁻¹(vs)
  - +：(920～780)cm⁻¹(b)
    - 820cm⁻¹(m)：Kevlar
    - 840cm⁻¹(m)：Polyamid III
    - 690cm⁻¹(m)：聚苯并咪唑
    - 780cm⁻¹(m)：Nomex
    - 1700cm⁻¹(sh)
      - −：羊毛，蚕丝
      - +：Kynol, Qiana 聚酰胺类
  - −：1770cm⁻¹(s)
    - +：Kermel
    - −：2240cm⁻¹(vs)
      - +：聚丙烯腈
      - −：≈3300cm⁻¹(b)
        - +：600cm⁻¹(m)
          - +：Cordelan
          - −：棉花
        - −：(1450,1380)cm⁻¹(s)
          - +：1435cm⁻¹(m)
            - +：聚丙烯
            - −：聚乙烯
          - −：聚四氟乙烯

注：vs—极强谱带；

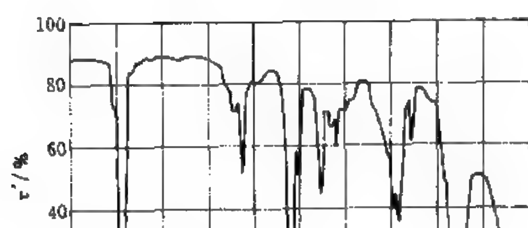
s—强谱带；

m—中强谱带；

w—弱谱带；

sh—肩峰谱带；

b—宽谱带


100
80
60
40
τ/%

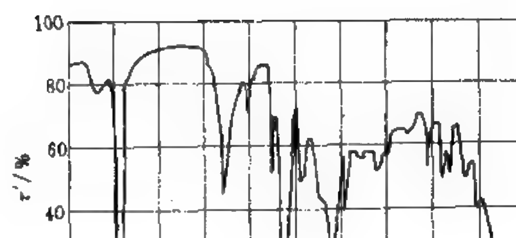
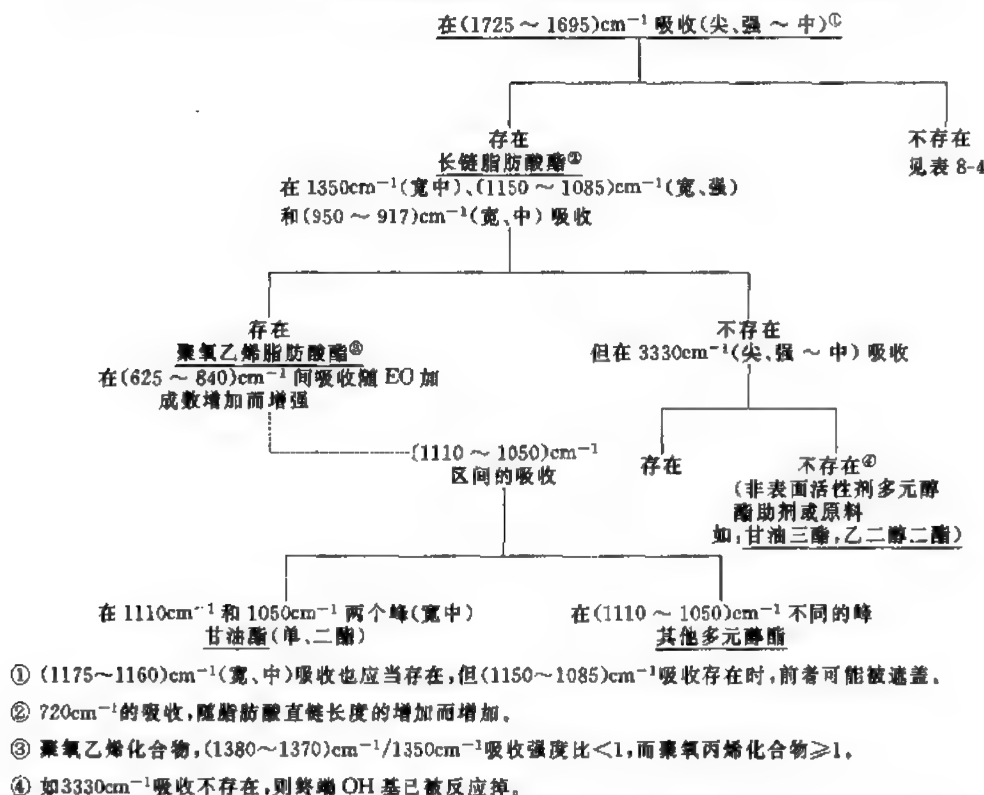

100
80
60
40
τ/%

表 20-29 无 N、S、P 及无金属元素的非离子表面活性剂(NSAA)的红外光谱分析(Ⅰ)



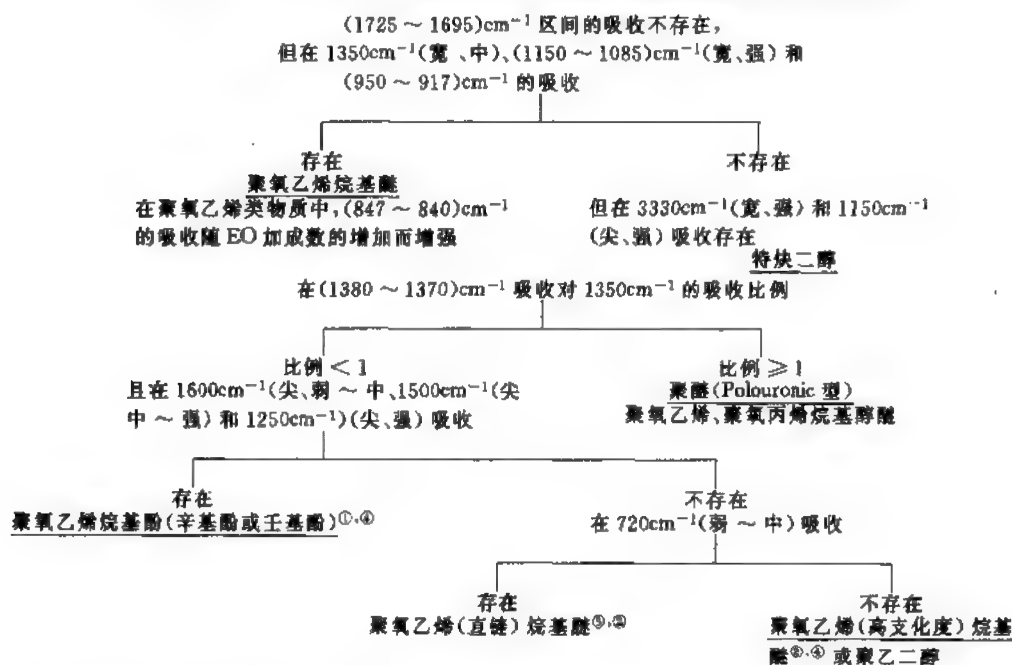
① (1175~1160)cm⁻¹(宽、中)吸收也应当存在,但(1150~1085)cm⁻¹吸收存在时,前者可能被遮盖。

② 720cm⁻¹的吸收,随脂肪酸直链长度的增加而增加。

③ 聚氧乙烯化合物,(1380~1370)cm⁻¹/1350cm⁻¹吸收强度比<1,而聚氧丙烯化合物≥1。

④ 如3330cm⁻¹吸收不存在,则终端 OH 基已被反应掉。

表 20-30 无 N、S、P 及无金属元素的非离子表面活性剂的红外光谱分析(Ⅱ)



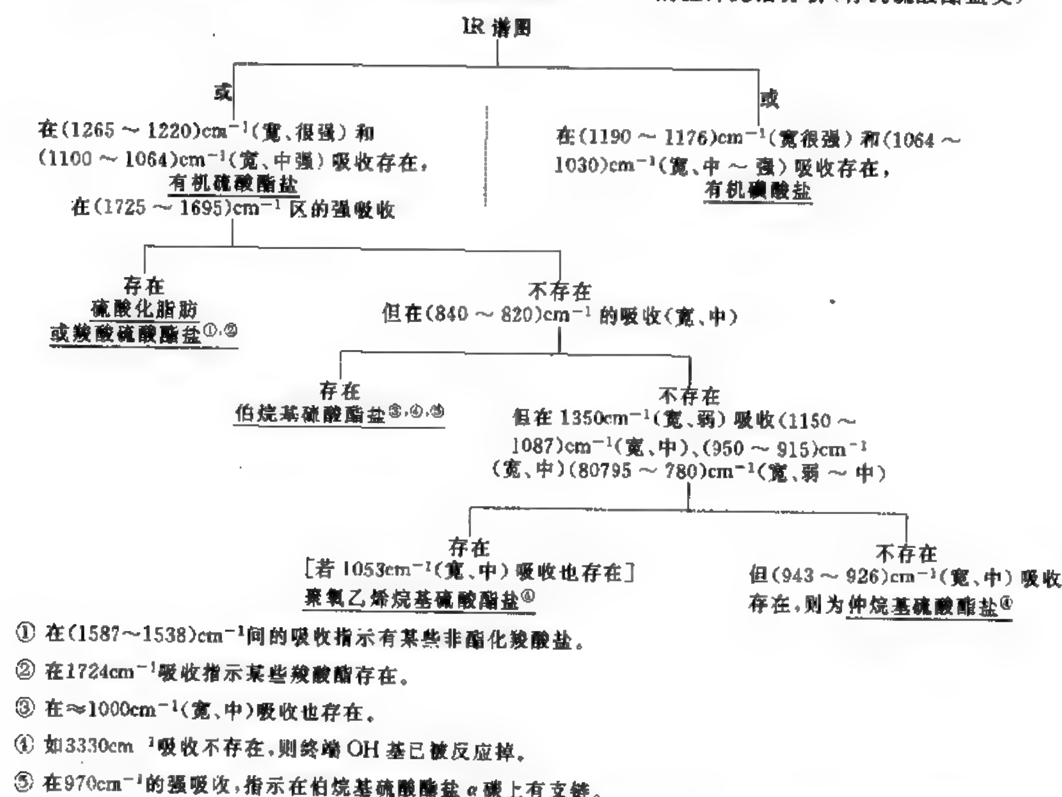
① 在825cm⁻¹(宽、中)的吸收指出是对-聚氧乙烯烷基酚醚;
在750cm⁻¹(宽、中)吸收为邻-聚氧乙烯烷基酚醚;
在≈885cm⁻¹和≈833cm⁻¹的吸收为间-聚氧乙烯烷基酚醚。

② 720cm⁻¹的吸收随脂肪酸直链长度的增加而增加。

③ 在820cm⁻¹的吸收(尖、弱)指示为脱水松脂衍生物。

④ 如3330cm⁻¹吸收不存在,则终端 OH 基已被反应掉。

表 20-31　含S、无N、P的阴离子表面活性剂(ASAA)的红外光谱分析(有机硫酸酯盐类)



① 在(1587～1538)cm^{-1}间的吸收指示有某些非酯化羧酸盐。

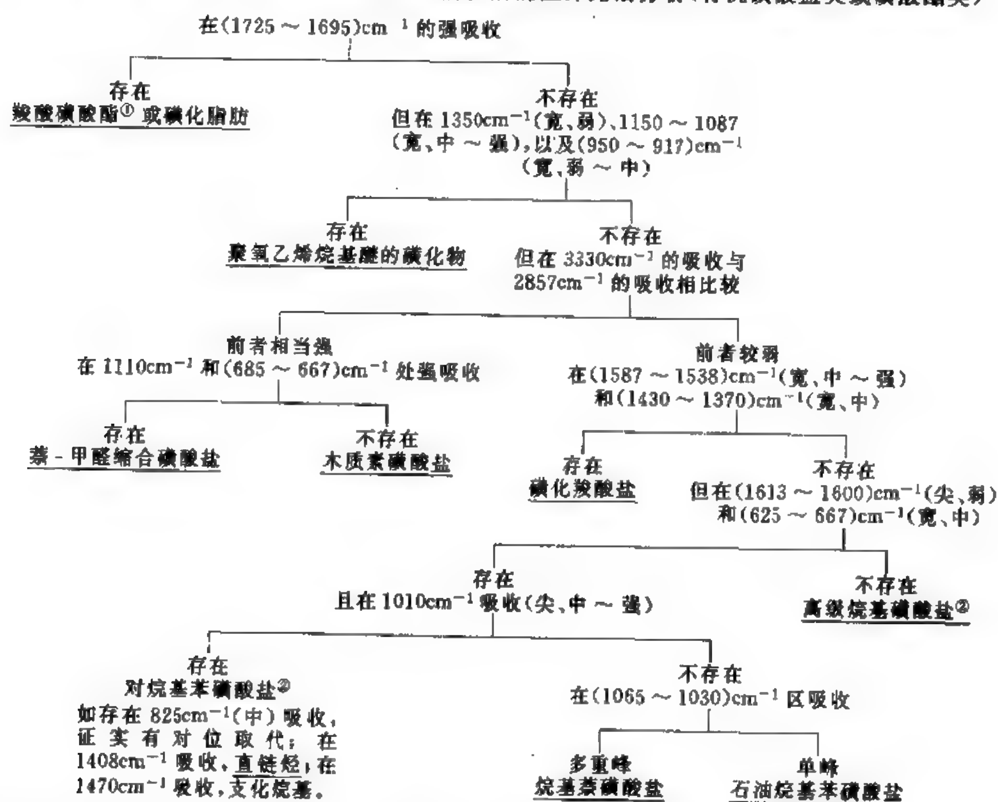
② 在1724cm^{-1}吸收指示某些羧酸酯存在。

③ 在≈1000cm^{-1}(宽、中)吸收也存在。

④ 如3330cm^{-1}吸收不存在，则终端OH基已被反应掉。

⑤ 在970cm^{-1}的强吸收，指示在伯烷基硫酸酯盐 α 碳上有支链。

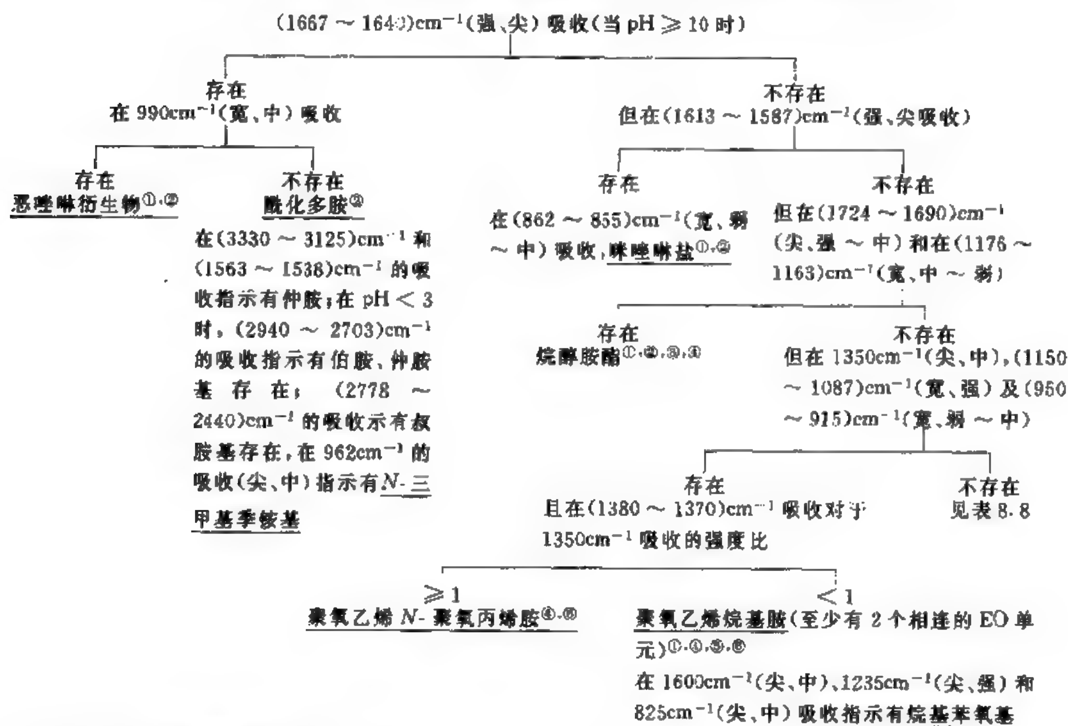
表 20-32　含S、无N、P的阴离子表面活性剂的红外光谱分析(有机磺酸盐类或磺酸酯类)



① 在(1587～1538)cm^{-1}和(1428～1370)cm^{-1}的吸收，指示有某些非酯化羧酸盐。

② 在720cm^{-1}的吸收指示有直链烷基。

表 20-33　含 N，无 S、P 的阳离子表面活性剂(CSAA)的红外光谱分析(Ⅰ)



① 720cm⁻¹吸收指示烷基直链长度。

② (3330～3225)cm⁻¹(宽、强)和1050cm⁻¹(宽中)吸收通常指 N-烷羟基。

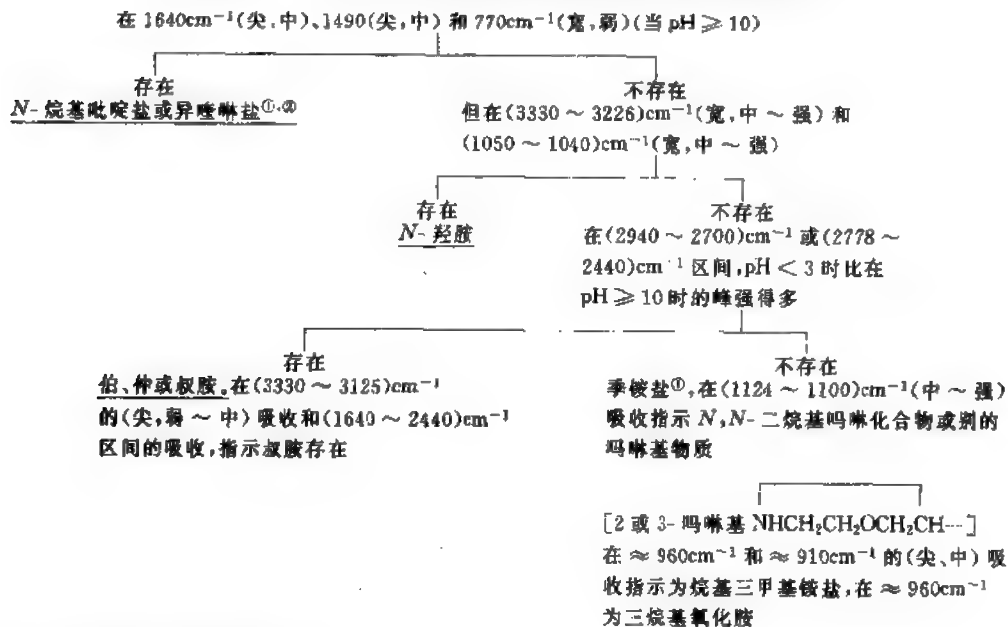
③ 聚氧乙烯基显示1350cm⁻¹(尖、中)、(1150～1085)cm⁻¹(宽、中-强)(950～915)cm⁻¹(宽，弱)吸收。

④ 在(860～840)cm⁻¹的吸收随EO数增加而加强。

⑤ 820cm⁻¹的吸收(尖、弱)指示为脱水松脂衍生物。

⑥ 具有高 EO 数(＞10mol)的物质，其谱图中，含 N 阳离子的吸收可能被掩盖(见表8.9)。

表 20-34　含 N，无 S、P 的阳离子表面活性剂的红外光谱分析(Ⅱ)

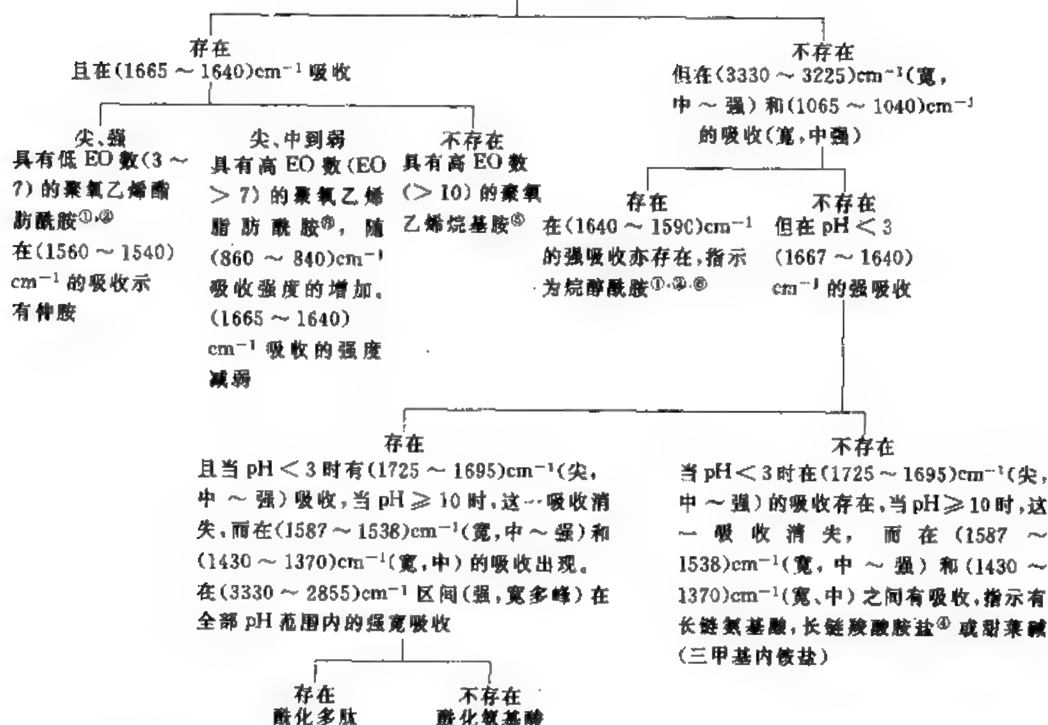


① 720cm⁻¹吸收指示烷基直链长度。

② N-烷基吡啶盐显示680cm⁻¹(宽，中)吸收。

表 20-35　含 N,无 S、P 无金属元素的非离子、阴离子或两性型(AmSAA)表面活性剂的红外光谱分析

在 1350cm⁻¹(尖,中),(1150～1087)cm⁻¹(宽,强)和(950～920)cm⁻¹(宽,弱～中)的吸收



① 720cm⁻¹吸收指示烷基直链长度。

② 在(1725～1695)cm⁻¹的吸收和在(3330～3226)cm⁻¹的弱吸收,指示有部分酯化了的羟基。

③ (860～840)cm⁻¹的吸收随 EO 数增加而加强。

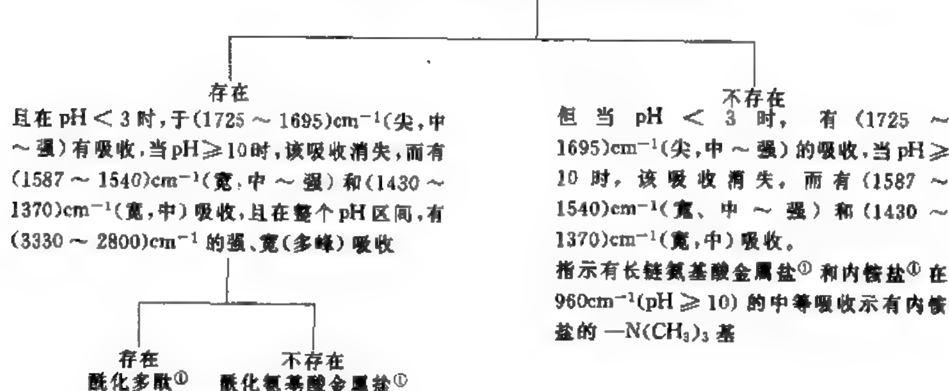
④ *N*-烷基氨基酸类和胺盐类在(3030～2700)cm⁻¹或(2780～2440)cm⁻¹(pH＜3)有相当强的吸收,长链羧酸胺盐类(在 pH＜3)会生成一种不含 N 的不溶性羧酸。

⑤ 当这些化合物的 EO 数增加时,其阳离子型的行为更为减弱,趋向非离子型。聚氧乙烯 N-聚氧丙烯胺类(表8-7),(1380～1370)cm⁻¹/1350cm⁻¹的吸收比例≥1。

⑥ 在(1560～1540)cm⁻¹(pH＜3)示有烷醇酰胺。

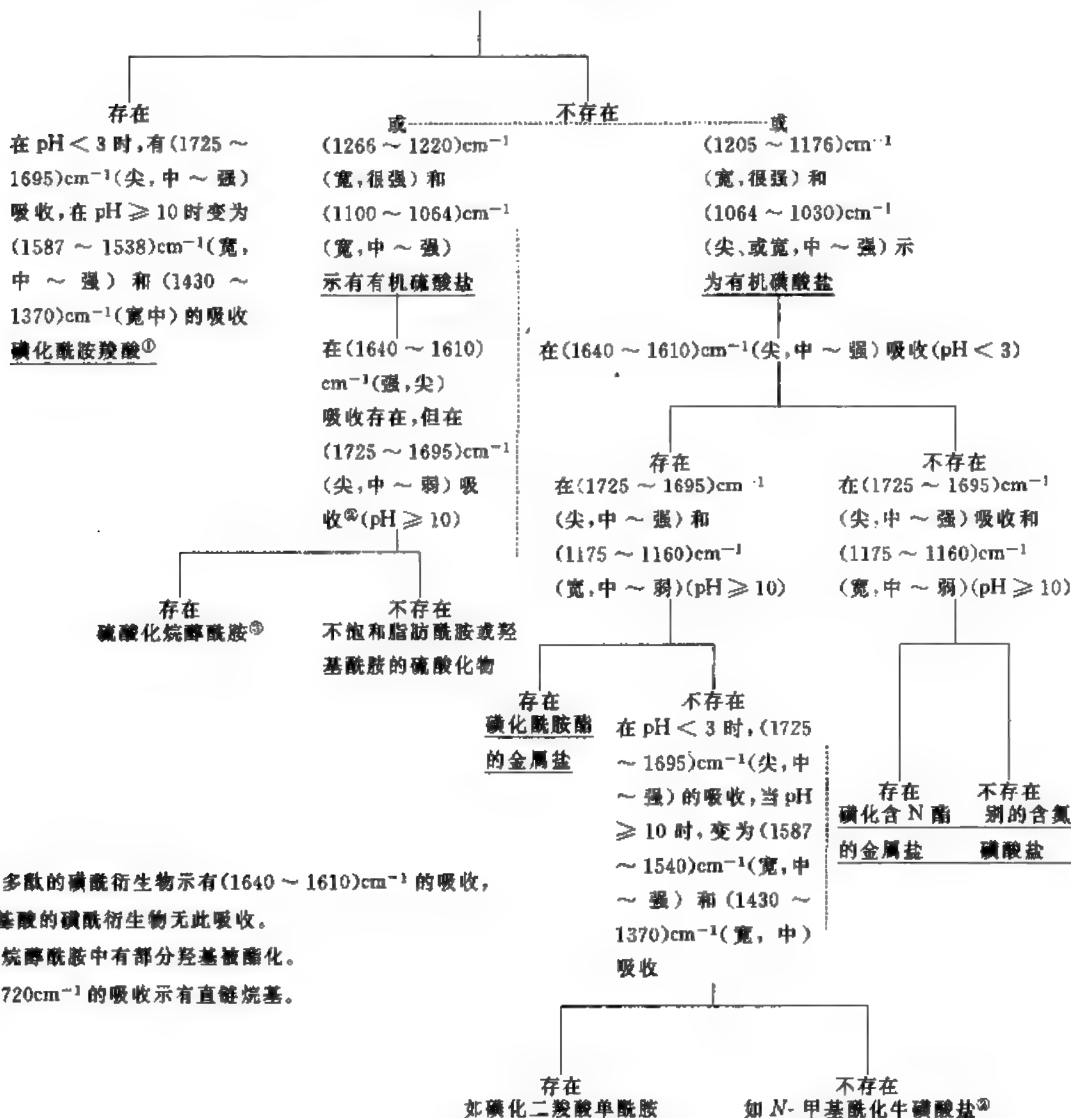
表 20-36　含 N 和金属元素,无 S、P 的阴离子型或两性型表面活性剂的红外光谱分析

在(1667～1587)cm(pH＜3)的强吸收



① 720cm⁻¹吸收指示烷基直链长度。

表20-37 含N和S，无P的阴离子表面活性剂的红外光谱分析



① 多肽的磺酰衍生物示有(1640～1610)cm⁻¹的吸收，而氨基酸的磺酰衍生物无此吸收。

② 烷醇酰胺中有部分羟基被酯化。

③ 720cm⁻¹的吸收示有直链烷基。

（三）增塑剂红外光谱系统鉴别

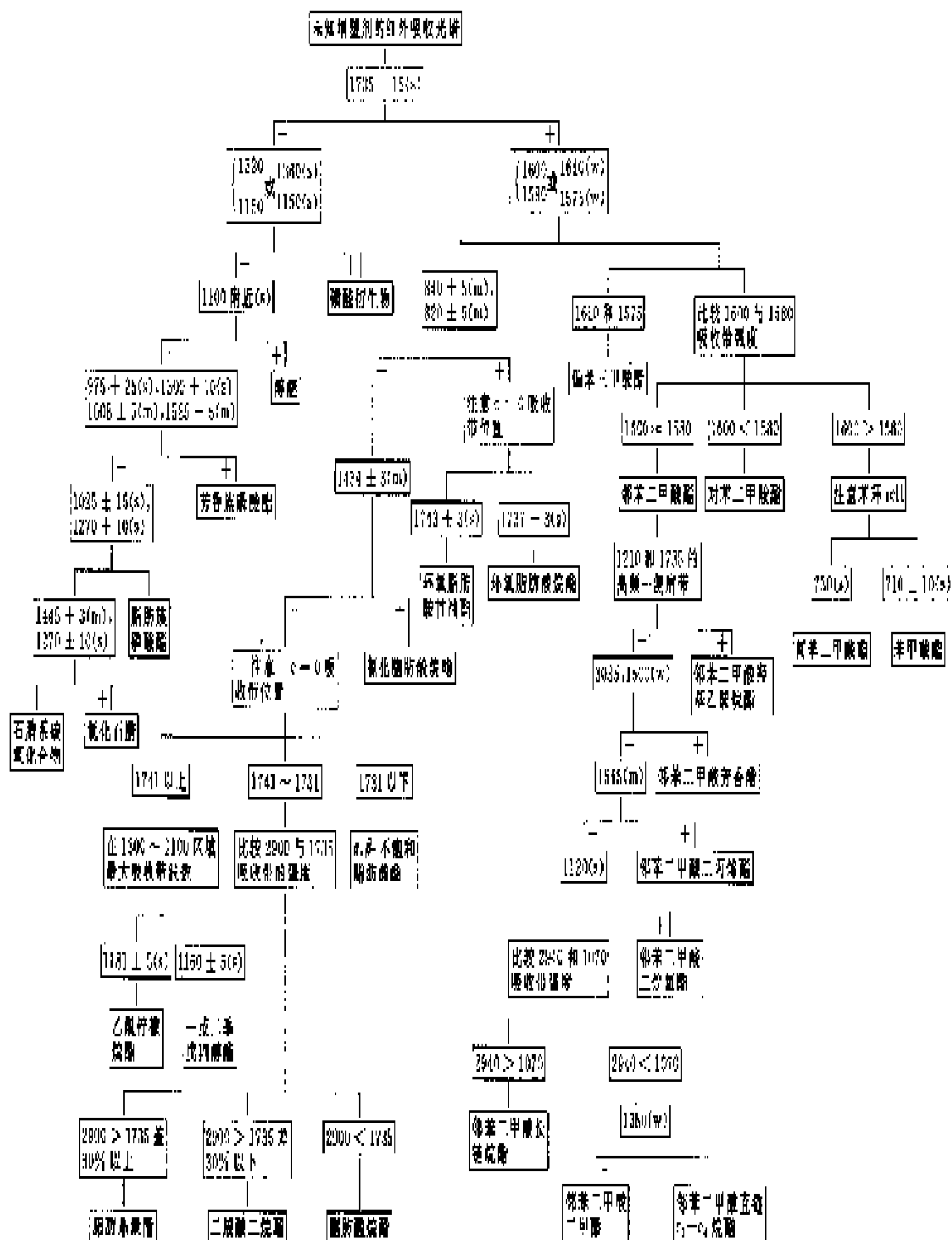
表20-38（第1113页）给出了增塑剂红外光谱系统鉴别表。

第二节　红外光谱的定量分析

在早期，如70年代前，红外光谱定量分析，相对于紫外-可见光光谱，其应用范围是有限的。色散型的仪器单次测量噪声大，分辨低，杂散光的影响，尖峰测量上的困难，仪器的非线性包括化学非线性，谱带强度范围的非线性和干扰造成的非线性等原因造成测量误差较大，FTIR仪器的使用及采用计算机数据处理和修正克服了以上的困难。化学计量学中多组分同时定量分析的计算方法的发展，更为复杂混合物的定量分析提供了有力的工具，并在速度和准确度方面均得到很大的提高，其应用领域也迅速扩大。

表 20-38 增塑剂红外光谱系统鉴别表[X]

(单位/cm^{-1})



一、红外光谱定量分析原理

进行定量分析的基础仍是吸收定律：

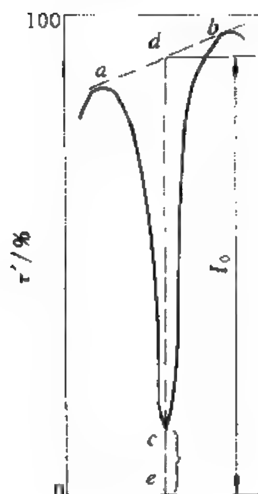


图 20-49 用基线法测量谱带吸光度

$$A=\lg 1/\tau'=\lg\frac{\phi_{tr}}{\phi_0}=abc$$

必须注意，百分透射率 τ' 和浓度 c 没有正比关系，因此当用 τ' 为记录的光谱进行定量时，必须将 τ' 转换为吸光度 A 后进行计算。

测量谱带吸光度的方法常用的是基线法，所谓基线法就是用基线来表示该分析物不存在时的背景吸收线，并用它来代替记录纸上的100%（透射率）坐标。其方法是：在吸收峰两侧选透射率最高处 a 与 b 两点作基点，过这两点切线称为基线，通过峰顶 c 作横坐标的垂线，和0%线交点为 e 和切线交点为 d（见图20-49），则

$$\frac{de}{ce}=\frac{\phi_{tr}}{\phi_0}\qquad A=\lg\frac{\phi_{tr}}{\phi_0}=\lg\frac{de}{ce}$$

基线还有其他几种画法（见图20-50），但每当确定一种画法后，在以后的测量中就不应改变。

用基线法测定吸光度受仪器操作条件的影响，因此从一种型号仪器获得的数据，如摩尔吸光系数往往不能运用到另外一种型号的仪器上，另外，它不能反映出宽的和窄的谱带之间的吸收差异。对更精确的测定，可采用积分吸光度法：

$$A=\int\lg\left(\frac{\phi_{tr}}{\phi_0}\right)_{\nu}\mathrm{d}\nu$$

即吸光度为线性波数条件下所记录的吸收曲线所包含的面积。

这个方法是测量由某一振动模式所引起全部吸收能量，它具有理论意义，而且给出更准确的测量数据。峰面积的测量可以通过数学的，机械的或电子积分技术完成，在 FTIR 仪上只要给出积分范围参数，即可算出其面积。

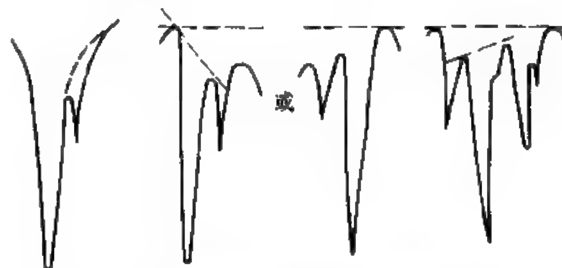


图 20-50 不同吸收峰形状时基线的画法

吸光度的可能误差见表20-39。

表 20-39 吸光度的可能误差测量的百分透射率①

误差类型	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ϕ_0的测量	0.43	0.62	0.83	1.09	1.44	1.96	2.80	4.48	9.49
ϕ_{tr}的测量	0.43	0.62	0.83	1.09	1.44	1.96	2.80	4.48	9.49
杂散光	4.14	2.56	1.98	1.67	1.47	1.33	1.22	1.13	1.07
吸收池不匹配	0.43	0.62	0.83	1.09	1.44	1.96	2.80	4.48	9.49
非线性	1.56	1.99	2.33	2.62	2.88	3.14	3.36	3.58	3.80
最大总误差	6.99	6.41	6.80	7.56	8.67	10.4	13.0	18.2	33.3

① 数据引自 J. W. Robinson："Handbook of Spectroscopy"，Vol. Ⅰ. 1974。

二、定量分析测量和操作条件的选择

（一）定量谱带的选择

理想的定量谱带应是孤立的，吸收强度大，遵守吸收定律，不受溶剂和样品其他组分干

扰，尽量避免在水蒸气和CO_2的吸收峰位置测量。当对应不同定量组分而选择两条以上定量谱带时，谱带强度应尽量保持在相数量级，对于固体样品，由于散射强度和波长有关，所以选择的谱带最好在较窄的波数范围内。

(二) 溶剂的选择

所选溶剂能很好溶解样品，与样品不发生反应，在测定范围内溶剂不产生吸收，为了消除溶剂吸收带影响，参比池可用变光程吸收池来补偿，或用计算机差谱技术。

(三) 选择合适的透射比区域

透射比控制在 (20～65)%范围之内。

(四) 测量条件选择

在色散型仪器上通常要求狭缝宽，增益低，时间常数大，扫描速度慢以确保测量准确度。

狭缝、增益和扫描速度三者的匹配要经过多次测试确定。仪器的分辨率 A、测量精确度 G 和扫描速度 R 三者之间的关系可用如下经验公式表示：

$$A^2 \times G \times \sqrt{R} = \text{常数}$$

由上式可知，只有两个量可以任意选择，而第三个量已由此决定了。例如欲以原来2倍的精确度来记录光谱而不降低分辨能力，则必须把记录时间延长为原来的4倍。

FTIR 仪的光源不稳定性可引起光谱的误差，包括镜速度的误差会产生鬼峰，动镜传动装置的倾斜降低光谱分辨率，因此做定量分析前要对仪器的100%线，分辨率、波数精度等各项性能标准进行检查。

用FTIR 仪进行定量分析，其光谱是把多次扫描的干涉图进行累加平均得到的。因为噪音是随机的，信号是有规律的，所以经过多次累加平均可以使随机噪音互相抵销，提高信噪比。根据统计理论，信噪比和累加次数的平方根成正比，只要实验数据重复性好，利用信号平均技术可检出淹没在噪音中的非常弱的实验信号。

定量分析要求 FTIR 仪器的室温恒定，否则光通量变化太大，影响测量准确度，因而每次开机后，均应检查仪器的光通量，保持相对恒定。另外，在每次样品的测试前，先测参比（背景）光谱可减少CO_2和水的干扰。仪器的长期稳定性，也影响定量分析的重现性和准确度。

(五) 吸收池厚度的测定

采用干涉条纹法测定吸收池厚度的具体做法是，将空液槽放于测量光路中，在一定的波数范围内进行扫描，这时就得到干涉条纹，见图20-51。

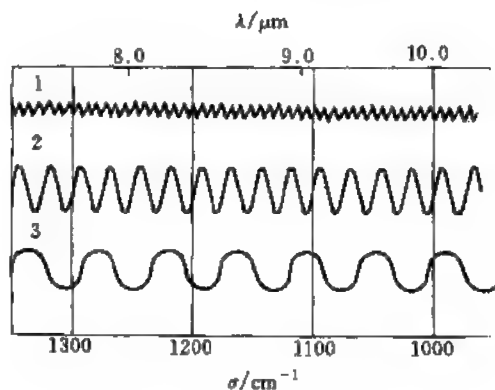


图 20-51　三个池的干涉波纹

利用下式计算液槽厚度 L：

$$L = \frac{n}{2(\sigma_2 - \sigma_1)}$$

式中，n 是干涉条纹个数，$\sigma_2 - \sigma_1$是波数范围。

根据液槽厚度可选择不同的扫描光谱范围，见表20-40。

例如在 (1825～625) cm^{-1}范围中出现24个干扰条纹，则

$$L = \frac{24}{2 \times (1825 - 625)} = 0.01(\text{cm})$$

表 20-40 液槽厚度 L 与光谱范围

L/mm	σ/cm^{-1}	L/mm	σ/cm^{-1}
0.0125	5000～1666	0.10	2500～833
0.025	5000～1666	0.30	1666～833
0.050	5000～1250	0.50	1428～714
0.075	3333～1000		

三、红外光谱定量分析方法

（一）单一组分样品的定量分析方法

1. 工作曲线法

用红外光谱定量时，往往所用狭缝较宽，光的单色性差，用直接计算法进行测定不易得到准确的结果，通常采用工作曲线法。工作曲线的横坐标为样品的浓度，纵坐标为对应分析谱带的吸光度。工作曲线是由测量一系列已知浓度的标准样品得到的，在制作工作曲线和测定样品时必须在同一液体池中进行。在正常情况下，如果测量和操作条件选择合适；保持仪器操作条件恒定，使用相同的液体池，就可以得到准确的结果，这主要是排除了由于狭缝宽度引起对比尔定律的偏差及化学缔合的影响。杂散光等一系列系统的重复性误差。

2. 比例法

在有些情况下，要求分析二元混合物中两个组分的相对含量，例如：分析二元共聚物或二元异构体混合物，这时可以采用比例法。对于二元体系，若两组分定量谱带不重叠，则

$$A_1=a_1bc_1 \qquad A_2=a_2bc_2$$

$$R=\frac{A_1}{A_2}=\frac{a_1bc_1}{a_2bc_2}=\frac{a_1c_1}{a_2c_2}=K\frac{c_1}{c_2}, \quad K=\frac{a_1}{a_2}$$

$$c_1+c_2=1$$

$$C_1=\frac{R}{K+R}, \quad C_2=\frac{K}{K+R}$$

K 值可由标准样品测得，R 是被测样品二组分定量谱带峰顶处的吸光度比值。由此就可以计算 c_1 和 c_2，若测定样品的浓度变化范围大。K 值往往不是恒定的，这时可以 R 对 c_1/c_2 作图测定未知样的 R 值，由图求 c_1/c_2。

3. 内标法

当用 KBr 压片，或油糊法或液膜法时，因为光通路厚度不易确定。在有些情况下可采用内标法。内标法是比例法的特殊情况。这个方法是选择一标准化合物，它的特征吸收峰与样品的分析峰互不干扰。取一定量的标准物质与样品混合，将此混合物制成 KBr 片或油糊绘制红外谱图，则有

$$A_s=a_sb_sc_s \qquad A_r=a_rb_rc_r$$

将这两式相除，因 $b_s=b_r$ 标，则得

$$\frac{A_s}{A_r}=\frac{a_s}{a_r}\cdot\frac{c_s}{c_r}=K\cdot c_s$$

通常是将样品和内标按不同比例混合作工作曲线。

在选用内标时，应考虑下列几点：

①其红外光谱比较简单，不干扰样品测定；

②热稳定，不吸潮；

③易纯化；

④具有一定不受样品谱带干扰的强谱带；

⑤适合于样品制备技术。

常用的内标物有：Pb（SCN）$_2$　2045cm^{-1}；Fe（SCN）$_2$　1635，2130cm^{-1}；KSCN 2100cm^{-1}；NaN_3　640，2120cm^{-1}；C_6Br_6　1300，1255cm^{-1}。

（二）多组分样品的定量分析

1.解联立方程方法

多组分样品的定量分析的经典方法是解联立方程方法，该法主要用于处理二元或三元混合体系。若方程组出现"病态"时，往往出现较大的偏差，为避免这种现象，应考虑以下条件：

①在分析峰位置处的吸光度 A 对浓度 c 的关系尽量符合吸收定律；

②分析峰处各组分之间的吸收系数差别要大；

③分析峰的位置应尽量选在"峰尖"，而不要选择"峰肩"位置；

④尽量选择该组分的特征峰作为分析峰或选择该组分的相对较强峰为分析峰。

2.差示法

该法可用于测量样品中的微量杂质，例如有两组分 A 和 B 的混合物，微量组分 A 的谱带被主要组分 B 的谱带严重干扰或完全掩蔽。这时可以利用差示法来测量微量组分 A。早期主要采用光学差谱技术，即在参比光路中放入只含有 B 组分样品的溶液，在 B 组分的光谱中选择一条不受 A 组分谱带干扰的谱带作为补偿标准，逐渐改变参比光路中液体池的厚度，直至两光路中 B 组分的吸收相等。即此内标谱带在测量的光谱中完全消失，其后在 A 组分分析谱带区内扫描，就可以把 B 组分谱带的干扰去掉，可以直接测量 A 组分分析谱带的吸光度。但这时 A 组分分析谱带的强度很弱，可使用纵坐标扩展，以提高测量准确度。但光学差谱技术受吸收池特性的影响很大。在实际工作中远远不能满足需要，随着计算机的发展，在目前很多红外光谱仪中都配有能进行差谱的计算机软件功能。另外对差谱前的光谱采用累加平均数据处理技术。对计算机差谱后所得的差谱图采用平滑处理和纵坐标扩展，因而可以得到十分优良的差谱图，这样为应用差示法于定量分析提供了很好的条件。

3.化学计量学的方法

目前常用的化学计量学中求解联立方程组的方法有十多种，可参阅文献[10]。作为每一种方法都各有其特点和适用范围，可以根据以下指标进行选择：

①计算结果的准确度；

②计算时间；

③对方程数目的依赖性；

④对光谱定量峰位置选择的依赖性；

⑤对病态方程的适应性；

⑥由于化学原因造成的体系非线性所要求的特定解法。

4.红外定量分析的绝对标准

由于红外光谱中每一条谱带的吸收率都是不同的，因此在大多数情况下，红外光谱定量工作需要和其他分析方法或标准物对照，以得到绝对的测量数据。

红外定量分析校准的方法很多，主要有如下几种：

（1）化学分析法　在测量高聚物的端基（如羧基、羟基）时，可使用化学滴定方法，在测量某些共聚物（如丙烯氰或氯乙烯的共聚物）的组分时，可使用元素分析方法，从氮或氯的含量可计算出共聚物的组分比。

(2) 核磁共振法　使用^{1}H的核磁共振波谱仪测量，其各谱线的强度和对应的H原子数目成正比，因此可得到绝对的测量结果，可用来作为红外定量的标准。

(3) 放射性同位素法　在测量共聚物（如乙烯-丙烯共聚物）的组分比时，可以合成某些带有^{14}C标记单体（一般为乙烯）的共聚物。这种共聚物的红外光谱和原来的相同，可作红外测量，而共聚物的绝对组分比可由放射性测量决定。从这种共聚物的红外定量测量所得到的谱带吸收率或吸收率之比可转用到一般的共聚物中。用这种方法所测得的数据是很精确的。

(4) 均聚物的混合物　经常应用一定配比的均聚物的混合物作为测量共聚物组分比的绝对标准。这是一种很简便的方法，但有时不够精确。

(5) 模型化合物　模型化合物是一种特殊选定的化合物，其结构和所测量的高聚物某个特定基团相似。如采用正戊醇作为测量羟基封头的聚丁二烯中羟基含量的模型化合物。

（三）无需标准试样的红外光谱定量方法

方法是基于同时测定大量组成各异的待测试样的各定量谱带的吸光度，运用最小二乘法求各组分的定量谱带吸收系数的最佳值，以此计算各试样的组成，现以二组分体系说明其原理。

设两组分的定量谱带彼此不干扰，则对组分1得：

$$A_1=a_1c_tc_1b$$

式中　A_1——组分1在其定量谱带处的吸光度；

a_1——组分1在其定量谱带处的吸收系数；

c_t——溶液总浓度，以mol/L或g/L表示；

c_1——为组分1在试中含量，以摩尔分数或质量分数表示；

b——吸收池厚度，cm。

令

$$\frac{A_1}{c_tb}=A_1^0$$

所以

$$A_1^0=a_1c_1$$

同样对于组分2有：

$$A_2^0=a_2c_2$$

因混合物中只有两组分，故：

$$c_1+c_2=1$$

所以

$$A_1^0\frac{1}{a_1}+A_2^0\frac{1}{a_2}=1$$

设有m个组成各异的待测试样，则得到如下的条件方程组

$$\begin{cases}A_{11}^0\dfrac{1}{a_1}+A_{21}^0\dfrac{1}{a_2}=1\\A_{12}^0\dfrac{1}{a_1}+A_{22}^0\dfrac{1}{a_2}=1\\\quad\vdots\\A_{1m}^0\dfrac{1}{a_1}+A_{2m}^0\dfrac{1}{a_2}=1\end{cases}$$

运用最小二乘法原理，将条件方程组变换成标准方程组，得

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{m}(A_{1i}^{0})^{2}\frac{1}{a_1}+\sum_{i=1}^{m}(A_{1i}^{0}A_{2i}^{0})\frac{1}{a_2}=\sum_{i=1}^{m}A_{1i}^{0}\\ \sum_{i=1}^{m}(A_{1i}^{0}A_{2i}^{0})\frac{1}{a_1}+\sum_{i=1}^{m}(A_{2i}^{0})\frac{1}{a_2}=\sum_{i=1}^{m}A_{2i}^{0}\end{cases}$$

解上述方程，即可得 a_1 和 a_2，由此即可求得 c_1 和 c_2。

根据同样原理，可测三组分或更多组分含量。

参考文献

1 岛内武彦著.红外线吸收光谱解析法，北京：科学出版社，1960
2 南京药学院主编.分析化学，北京：人民卫生出版社，1979
3 朱善农等著.高分子材料的剖析，北京：科学出版社，1988
4 Socrates G. Infrared Characteristic Group Frequencies，Chicherster：John Wiley & Sons，1980
5 王宗明等.实用红外光谱学，北京：石油化学工业出版社，1978
6 Anderson D G，et al. An Infrared Spectroscopy ATLAS for The Coatings Industry，Philadelphia：Federation of Societies for Coatings Technology，1980
7 王正熙编著.红外光谱分析和鉴定，成都：四川大学出版社，1989
8 中华人民共和国国家标准 GB7764—87，1987
9 钟　雷，丁悠丹编著.表面活性剂及其助剂分析，杭州：浙江科学技术出版社，1986
10 吴瑾光主编.近代傅里叶变换红外光谱技术及应用，(上卷)北京：科学技术文献出版社，1994

第二十一章　拉曼光谱分析法

1923 年德国物理学家 A. Smekal[1]首先预言了光的非弹性散射，1928 年印度物理学家拉曼观察到苯和甲苯对光的非弹性散射效应，并命名为拉曼效应[2]。随后以拉曼效应为基础，建立了拉曼光谱分析法，到 60 年代，使用激光器作为拉曼光谱的激发光源，使拉曼光谱技术有了很大发展。但在以后的十多年间，仍未得到工业分析人员的广泛应用。1986 年 Hirschfeld[3]首次报告了固体和液体的近红外傅里叶变换拉曼光谱，FT-Raman 光谱仪的问世又一次推动了拉曼光谱的发展，使拉曼光谱在无机和有机分析化学、生物化学、高分子化学、石油化学和环境科学等领域得到日益广泛的重视。

第一节　拉曼光谱的基本原理[4~6]

一、拉曼效应和拉曼位移

当频率为 ν_0 的单色辐射照射到物质上时，大部分入射辐射透过物质或被物质吸收，只有一小部分辐射被样品分子散射。入射的光子和物质分子相碰撞时，可发生弹性碰撞和非弹性碰撞，在弹性碰撞过程中，光子与分子之间不发生能量交换，光子只改变运动方向而不改变频率 (ν_0)，这种散射过程叫弹性散射，亦称为瑞利散射 (Rayleigh Scattering)。而在非弹性碰撞过程中，光子与分子之间发生能量交换，光子不仅要改变运动方向，它还放出一部分能量给予分子，或从分子吸收一部分能量，从而改变了光子的频率。由非弹性散射引起含有其他频率的散射光的现象称为拉曼效应，这种散射过程称为拉曼散射 (Raman Scattering)。比入射辐射频率 ν_0 低的散射线 ($\nu_0-\nu_1$) 称为斯托克斯线 (Stokes lines)，高于入射辐射频率的散射线 ($\nu_0+\nu_1$) 称为反斯托克斯线 (anti-Stokes Lines)。

斯托克斯线，反斯托克斯线与入射辐射之间频率差 ν_1 称为拉曼拉移。

$$\nu_1=(\nu_0+\nu_1)-\nu_0=\nu_0-(\nu_0-\nu_1)=\frac{E_1-E_0}{h} \tag{21-1}$$

式中，E_1 和 E_0 分别是高低两个不同振动能级的能量，由此可知，拉曼位移与入射光频率无关，而与样品分子的振动能级有关。

上述的光散射过程可用能级跃迁图图 21-1 说明。

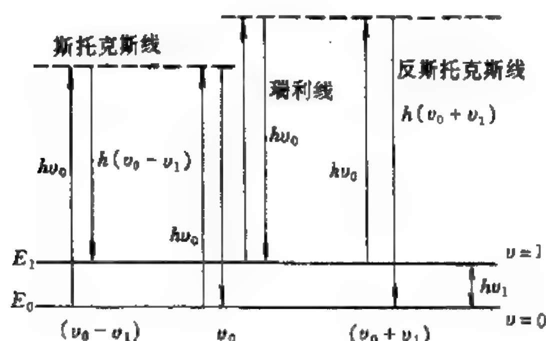


图 21-1　拉曼散射和瑞利散射的级能图

E_0 和 E_1 是分子振动（或转动）能级，一种情况是处于基态 E_0 的分子受入射光子 $h\nu_0$ 的激发而跃迁到受激虚态（图中的虚线表示），然后很快地从虚态跃迁回基态，把吸收的能量 $h\nu_0$ 以光子（频率为 ν_0）的形式释放出来，这就是弹性碰撞，对应于瑞利散射。受激虚态的分子还可跃迁回到激发态

E_1，这时分子吸收了部分能量 $h\nu_1$，并释放出能量为 $h(\nu_0-\nu_1)$ 的光子，这就是非弹性碰撞，对应于拉曼散射，所产生的散射光为斯托克斯线；另一种情况是处于激发态 E_1 的分子受入射光子 $h\nu_0$ 的激发而跃迁到受激虚态，然后跃迁回激发态 E_1，释放出频率为 ν_0 的光子，即瑞利散射，但亦可能跃迁回基态 E_0，这时分子失掉了 $h\nu_1$ 的能量，并释放出能量为 $h(\nu_0+\nu_1)$ 的光子，即为反斯托克斯线。

斯托克斯线和反斯托克斯线统称为拉曼谱线，由波尔兹曼定律可知，在通常情况下，分子绝大多数处于振动能级基态，所以，斯托克斯线的强度远远强于反斯托克斯线。

二、拉曼散射的经典理论处理简述[6]

拉曼散射效应是光子撞击分子产生极化而造成的，这种极化是分子内核外电子云的变形，设入射辐射的电场强度为 E，则产生的诱导偶极矩 μ 为

$$\mu=\alpha E \tag{21-2}$$

α 为分子的极化率，可看成是由外电场引起的分子电子云变形程度。

入射辐射电场 E 与时间 t 的关系为：

$$E=E_0\cos 2\pi\nu_0 t \tag{21-3}$$

式中 E_0 为电场振幅；ν_0 为频率；t 为时间，将式（21-3）代入式（21-2）得

$$\mu=\alpha E_0\cos 2\pi\nu_0 t$$

在频率很小时，极化率 α 随核间距的变化可用泰勒级数展开，

$$\alpha=\alpha_0+\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0 Q+\text{高次项} \tag{21-4}$$

式中 Q 为简正坐标，相当于振动位移坐标，α_0 为处于平衡位置时的极化率。当分子以基频振动频率 ν_{vib} 作简谐振动时，

$$Q=Q_0\cos 2\pi\nu_{vib} t$$

则

$$\alpha=\alpha_0+\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0(Q_0\cos 2\pi\nu_{vib} t)$$

$$\begin{aligned}\mu&=\left[\alpha_0+\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0 Q_0\cos 2\pi\nu_{vib} t\right]E_0\cos 2\pi\nu_0 t\\&=\alpha_0 E_0\cos 2\pi\nu_0 t+\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0 E_0Q_0\cos 2\pi\nu_0 t\cos 2\pi\nu_{vib} t\\&=\alpha_0 E_0\cos 2\pi\nu_0 t+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0 E_0Q_0[\cos 2\pi(\nu_0-\nu_{vib})t+\cos 2\pi(\nu_0+\nu_{vib})t]\end{aligned} \tag{21-5}$$

从式（21-5）可得两种情况：

（1）$\nu=\nu_0$，$\mu=\alpha_0 E_0\cos 2\pi\nu_0 t$ 为瑞利散射；

（2）$\nu=\nu_0\pm\nu_{vib}$，$\mu=\frac{1}{2}E_0Q_0\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0[\cos 2\pi(\nu_0\pm\nu_{vib})t]$ 为拉曼散射。

其中 $\nu_0+\nu_{vib}$ 为反斯托克斯线，而 $\nu_0-\nu_{vib}$ 为斯托克斯线。

诱导偶极矩随三个频率 ν_{vib}，$(\nu_0-\nu_{vib})$ 和 $(\nu_0+\nu_{vib})$ 改变而变化，若振动未引起分子极化率改变，无诱导偶极矩，没有拉曼散射产生，只有瑞利散射。

三、拉曼活性振动

能引起分子极化率改变的振动是拉曼活性振动，分子具有三维空间坐标，其极化作用在 x，y 及 z 三方向上，服从下列公式：

$$x\text{方向} \qquad \mu_x=\alpha E_x$$
$$y\text{方向} \qquad \mu_y=\alpha E_y \tag{21-6}$$
$$z\text{方向} \qquad \mu_z=\alpha E_z$$

μ_x，μ_y 及 μ_z 分别表示三个方向的诱导偶极矩，E_x，E_y 和 E_z 分别表示三个方向上的电场。

如果分子诱导偶极矩的变化各向相同，可用式（21-2）表示，但实际上为各向异性，故需采用下面一组关系式表示三个方向的诱导偶极矩。

$$\mu_x=\alpha_{xx}E_x+\alpha_{xy}E_y+\alpha_{xz}E_z$$
$$\mu_y=\alpha_{yx}E_x+\alpha_{yy}E_y+\alpha_{yz}E_z$$
$$\mu_z=\alpha_{zx}E_x+\alpha_{zy}E_y+\alpha_{zz}E_z \tag{21-7}$$

式中，极化率 α_{xx}，α_{xy}，α_{xz}；α_{yx}，α_{yy}，α_{yz}及 α_{zx}，α_{zy}，α_{zz}是比例常数，它们是对称张量。采用矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix}\mu_x\\ \mu_y\\ \mu_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz}\\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_{yz}\\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_{zz}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_x\\ E_y\\ E_z\end{bmatrix} \tag{21-8}$$

右边第一个矩阵称为极化率张量，极化率张量是对称的：$\alpha_{xy}=\alpha_{yx}$，$\alpha_{yz}=\alpha_{zy}$，$\alpha_{xz}=\alpha_{zx}$。

根据量子力学，在振动时，如果极化率张量的 6 个分量中有一个发生变化，则该振动是拉曼活性的，即至少需要一个非零的这种类型的积分：$\int\psi_v^0\mu\psi_0^0\mathrm{d}\tau$。这类积分中 μ 是一种笛卡尔坐标的二元函数，即 x^2，y^2，z^2，xy，yz，zx。这些二元函数（或这些函数的简单组合）在特征标表的右端列出，即这些表示是由二元函数形成的。由此可以得到简单的关于基频拉曼活性的定则[7]：

如果所包含的这个简正振动方式与分子的极化率张量的一个或多个的组分是属于相同的表示，则这个基频跃迁将是拉曼活性的。

例如甲烷为四面体结构，属于 T_d 点群，它具有 $3n-6=9$ 个振动自由度，其真实振动为 A_1+E+2F_2，由 T_d 的特征标表知，A_1 及 E 振动模式是拉曼活性的，而 F_2 振动模式是红外及拉曼均活性的。

拉曼活性振动亦可由下列方程决定[8]：

$$N_i(\alpha)=\frac{1}{N_g}\sum n_e\chi_\alpha(R)\chi_i(R) \tag{21-9}$$

其中 $\chi_\alpha(R)$ 是极化率的征数

$$\chi_\alpha(R)=2\pm2\cos\phi+2\cos2\phi$$

对于专一转动取正号，而对于非专一转动取负号，同时 $\chi_\alpha(R)$ 是 $\chi_i(R)$ 值的线性组合

$$\chi_\alpha(R)=\sum N_i(\alpha)\chi_i(R) \tag{21-10}$$

$N_i(\alpha)$是在 $\chi_\alpha(R)$ 中出现的振动型式的征数的倍数。

分子不同构型与基频的关系如表 21-1 所示。由此可以推断分子构型，这对金属化合物的构型测定是一种好的方法。

四、退　偏　度

拉曼谱带的退偏度（ρ）是拉曼光谱的一个重要参数[6]。激光具有线偏振性，将偏振器放在垂直于激光电矢量的方向上，并测定平行及垂直两个方向上某特性谱线的强度，那么两种

表 21-1　分子不同构型与基频的关系[5]

配位数	几何构型	点群	基频			
			拉曼活性	拉曼偏振	红外活性	拉曼-红外活性
2	直线	$D_{\infty h}$	1	1	2	0
	弯折	C_{2v}	3	2	3	2
3	平面三角	D_{3h}	3	1	3	3
	T形	C_{2v}	6	3	6	6
	角锥	C_{3v}	4	2	4	4
5	三角双锥	D_{3h}	6	2	5	3
	四方角锥	C_{4v}	9	3	6	6
7	五角双锥	D_{5h}	5	2	5	10
	变形三角棱柱	C_{2v}	18	6	15	15
	变形八面体	C_{3v}	11	5	11	11
	四面锥-三角锥结合体	C_s	18	10 或 11	18	18
8	正方体	O_h	4	1	2	0
	四方反锥	D_{4d}	7	2	5	0
	十二面体	D_{2d}	15	4	9	9
	双变形三角锥体	C_{2v}	21	7	17	17
	双变形三角反锥体	D_{3d}	6	3	7	0
	六面体双锥	D_{6h}	5	2	5	0
9	三变形三角锥	D_{3h}	11	3	8	5
	变形四方反锥	C_{4v}	17	5	11	11
	变形四方锥体	C_{4v}	17	5	11	11
10	双变形四方反锥体	D_{4d}	9	3	7	0
	双变形四方锥体	D_{4h}	9	3	7	0
12	二十面体	I_h	3	1	2	0
	截顶八面体	O_h	5	1	3	0
	截顶四面体	T_d	10	2	5	5

方向上的谱线强度比被称为退偏度

$$\rho=\frac{与激光电矢量垂直的谱线强度}{与激光电矢量平行的谱线强度}=\frac{I_{\perp}}{I_{/\!/}} \tag{21-11}$$

在图 21-2 (b) 中，y 方向入射的是平面偏振光，电矢量只有在 z 方向有分量，即入射光为 z 偏振光，此时的退偏度为

$$\rho_P=\frac{3\beta^2}{45\ (\bar{\alpha})^2+4\beta^2} \tag{21-12}$$

图 21-2 中，y 方向入射光为自然光的情况下，此时的退偏度为[6]

$$\rho_n=\frac{6\beta^2}{45\ (\bar{\alpha})^2+7\beta^2} \tag{21-13}$$

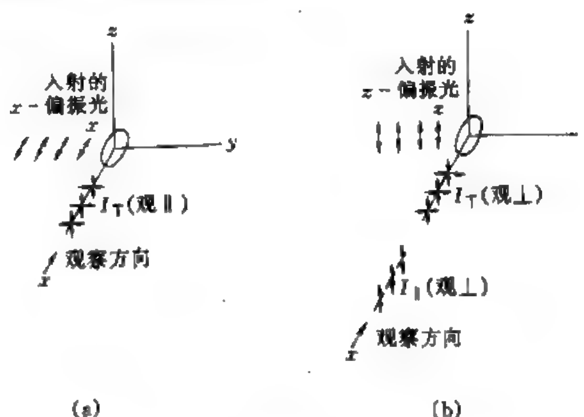


图 21-2　实验观察散射光强度示意图[6]

式中：$\bar{\alpha}=\frac{1}{3}(\alpha_{xx}+\alpha_{yy}+\alpha_{zz})$，$\beta^2=\frac{1}{2}\left[(\alpha_{xx}-\alpha_{yy})^2+(\alpha_{yy}-\alpha_{zz})^2+(\alpha_{zz}-\alpha_{xx})^2+\frac{1}{6}(\alpha_{xy}^2+\alpha_{yz}^2+\alpha_{zx}^2)\right]$由简正振动特征标表可知，只有全对称振动，$\bar{\alpha}$才不等于零，因而 ρ_n 值一定在 $0\leqslant\rho_n<\frac{6}{7}$之间，$\rho_P$ 在 $0\leqslant\rho_P<\frac{3}{4}$，而对于非全对称振动，$\bar{\alpha}$一般为零，故 $\rho_n=\frac{6}{7}$，$\rho_P=\frac{3}{4}$，因此可通过实验测定来了解不同拉曼谱带的偏振情况。若 ρ_n 在 0 与$\frac{6}{7}$之间，ρ_P 在 0 与$\frac{3}{4}$之间，称该谱带是偏振的。退偏度越接近零，产生的拉曼光越接

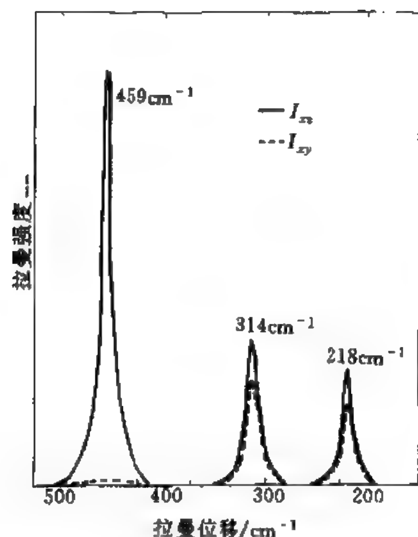


图 21-3　CCl_4 在两个偏振方向的拉曼光谱

近完全偏振光，表明分子的振动含有对称振动成分越多。若 $\rho_n=\frac{6}{7}$，$\rho_P=\frac{3}{4}$，则该谱带是退偏振的，即分子的振动含有非对称振动成分越多。

图 21-3[6]是 CCl_4 的部分拉曼光谱，入射光使用 488nm 的激光，图中实线部分为在 xz 平面内偏振光，虚线部分为 xy 平面内偏振光，可以看到它们的强度比 β_P 分别为 0.02(459cm^{-1})，0.75(314cm^{-1}) 和 0.75 (218cm^{-1})，因而 459cm^{-1} 谱是偏振的，而 314cm^{-1}和 218cm^{-1}两谱带是退偏振的。由此可知，从退偏度可获得简正振动的对称性及分子振动的对称性和其他物理化学性质。退偏度是拉曼光谱的一个重要物理常数。

第二节　拉曼光谱仪

拉曼光谱仪与红外光谱仪相比，其发展较缓慢，早期拉曼光谱仪以汞弧灯作激发光源，拉曼信号十分微弱，1960 年后，激光的出现，为拉曼光谱仪提供了最理想的光源，使传统色散型激光拉曼光谱仪得到很大的发展。但由于这类仪器使用的激发光源在可见区，对某些荧光很强的物质测量时，拉曼信号被“淹没”在很强的荧光中。傅里叶变换近红外激光拉曼光谱仪的出现消除了荧光对拉曼测量的干扰，FT-Raman 光谱仪以其突出的优点：无荧光干扰，扫描速度快，分辨率高等，愈来愈受人们的重视。初期的 FT-Raman 光谱仪是在 FTIR 光谱仪上加一 FT-Raman 附件，两者共用一个迈克尔逊干涉仪光学座。目前不少厂家已生产出专用的 FT-Raman 光谱仪。将特殊的光学显微镜与拉曼光谱组合而成的共焦激光拉曼光谱仪是近年推出的另一类型的拉曼光谱仪，它具有三维分辨能力，可以对地质矿物，生物样品做“光学切片”。

一、拉曼光谱仪结构概述

色散型激光拉曼光谱仪的结构示意图见图 21-4。该仪器主要由激光源，外光路系统（样

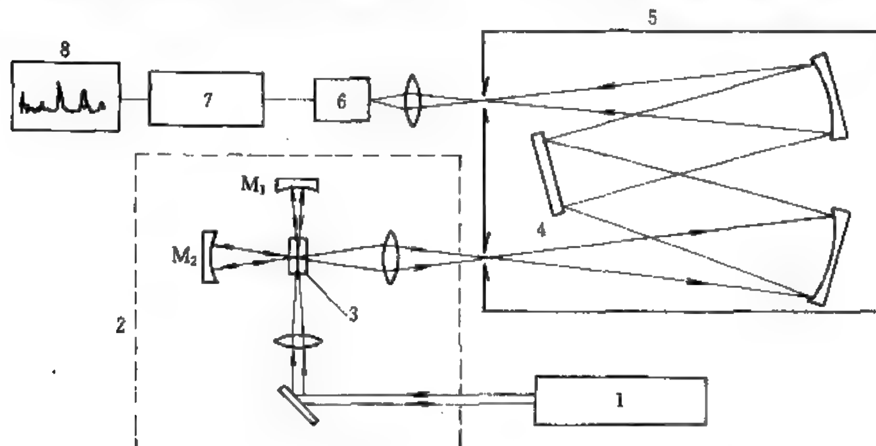


图 21-4　色散型激光拉曼光谱仪的结构示意图

1—激光源；2—外光路系统；3—样品室；4—光栅；5—单色仪；6—光电倍增管；7—放大器；8—记录仪

品室)，单色仪，放大系统及检测系统五部分组成。样品经来自激光源的可见激光激发，其绝大部分为瑞利散射光，还有少量的各种波长的斯托克斯散射光，以及更少量的各种波长的反斯托克斯散射光，后两者即为拉曼散射。这些散射光由反射镜等光学元件收集，经狭缝照射到光栅上，被光栅色散，连续地转动光栅使不同波长的散射光依次通过出口狭缝，进入光电倍增管检测器，经放大和记录系统获得拉曼光谱。

图 21-5 是 FT-Raman 光谱仪的光路图[10]。干涉仪和 FT-IR 光谱仪是相同的，检测器是液

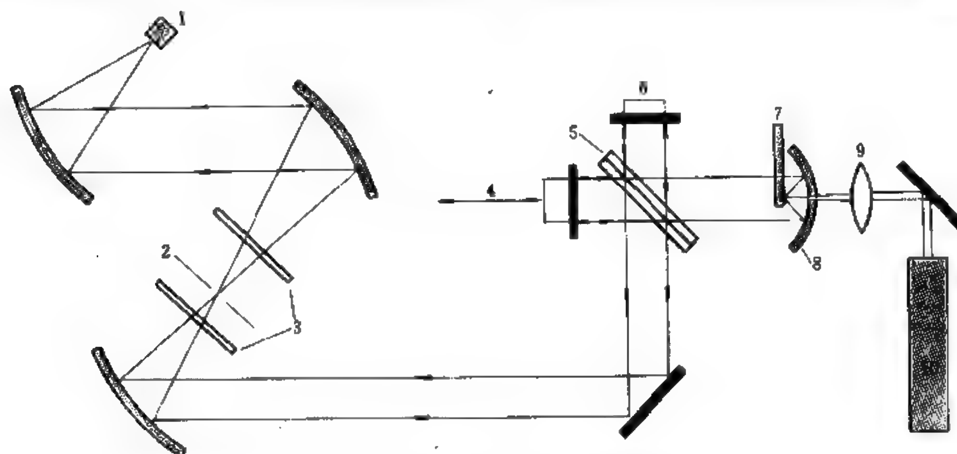


图 21-5 FT-Raman 光谱仪的光路图

1—液氮冷却锗检测器；2—空间性滤光片；3—介电体滤光片；4—移动镜；5—分束器；6—固定镜；7—样品室；8—抛物面聚光镜；9—200mm 透镜；10—Nd：YAG 激光器

氮冷却的锗检测器，通常在仪器中使用截断滤光片以限制比光源波长大的辐射到达检测器上。初期的 FT-Raman 光谱仪是在 FTIR 光谱仪上加一 FT Raman 附件，两者共用一个迈克尔逊干涉仪。图 21-6 是 Nicolet 800 型 FT-IR 与 FT-Raman 光谱仪光路图[11]，左边是 FT-IR 光路系统，右边为 FT-Raman 附件，采用 Nd：YAG 激光器（掺钕的钇-铝-镓柘榴石激光器）为激发光源（近红外，1064nm）。被样品散射后的近红外光的收集方式有反射式和折射式两种，激

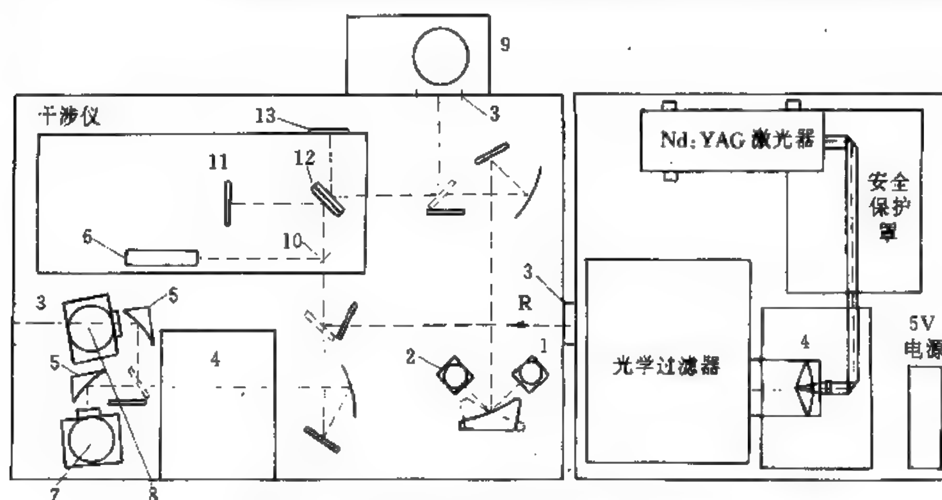


图 21-6 FT-IR 及 FT-Raman 光谱仪光路图

左图为 FT-IR 系统；右图为 FT-Raman 附件

R—处于 FT-Raman 工作状态时，拉曼辐射由此方向进入干涉仪，且反射镜处于虚线状态

1—红外光源；2—白光光源；3—附加出口；4—样品室；5—检测器聚光镜；6—激光器；7—检测器 1；8—检测器 2；9—尼高力傅立叶变换拉曼检测器；10—激光棱镜；11—动镜；12—分束器；13—固定镜

发光与拉曼辐射之间的夹角通常为90°或者180°，使用光学过滤器滤去占散射光绝大部分的瑞利散射光，光学系统为迈克尔逊干涉仪，分束器为多层涂Si的CaF_2，检测器为液氮冷却的Ge二极管或InGaAs检测器。

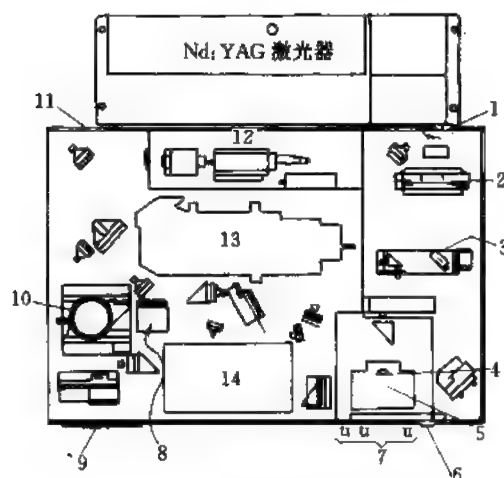


图21-7 Bio-Rad FT-Raman Ⅰ光谱仪示意图（说明见图）

1—Nd：YAG激光开关闸；2—可变衰减器；3—白光和Nd：YAG功率表附件；4—收集光学元件；5—样品位置；6—功率调节钮；7—样品台调节控制；8—光闸；9—控制面板；10—检测器；11—后背面板；12—参考激光器；13—干涉仪；14—瑞利线过滤器

目前已生产出专用的FT-Raman光谱仪，图21-7是伯乐公司专用FT-Raman光谱仪平面图[6]。

其结构由五部分组成：①光源部分，包括Nd：YAG激发光源及其快门，光源的可变衰减器，功率表，He-Ne激光器和白光光源；②样品仓，包括样品架集散射光的半透镜和聚集光学镜以及x、y、z三维样品位置调节器，在半透镜上方有安装偏振器的支架；③光学过滤器；④迈克尔逊干涉仪；⑤锗检测器。

二、拉曼光谱仪的基本部件

1. 激发光源

拉曼光谱仪的激发光源使用激光器，传统色散型激光拉曼光谱仪通常使用的激光器有Kr离子激光器，Ar离子激光器，Ar^+/Kr^+激光器，He-Ne激光器和红宝石脉冲激光器等。作为激光拉曼光谱的光源要符合以下要求：(1) 单线输出功率一般为（20～1000）mW；(2) 功率的稳定性好，变动不大于1%；(3) 寿命长，应在1000h以上。波长和功率。Ar^+激光器最常用的波长是514.5nm（绿色）和488.0nm（蓝紫色），Kr^+激光器最常用的是568.2nm和647.1nm。表21-2给出了不同激发光源的常用激发波长和功率。

表21-2 几种常用激发光源的激发波长及功率

λ/nm	激光器功率/mW				λ/nm	激光器功率/mW			
	Kr^+	Ar^+	Ar^+/Kr^+	He-Ne		Kr^+	Ar^+	Ar^+/Kr^+	He-Ne
3391	—	—	—	+	514.5	—	1400	200	—
1151	—	—	—	+	501.7	—	250	20	—
1084	—	—	—	+	496.5	—	400	50	—
799.3	30	—	—	—	483.0	—	1300	200	—
793.1	10	—	—	—	482.5	30	—	10	—
752.5	100	—	—	—	476.5	—	500	60	—
676.4	120	—	20	—	476.2	50	—	—	—
647.1	500	—	200	—	472.7	—	150	—	—
632.8	—	—	—	>50	465.8	—	100	—	—
611.8	—	—	—	+	457.9	—	250	20	—
568.2	150	—	80	—	454.5	—	100	—	—
530.9	200	—	80	—	351.1+363.8	—	20	—	—
520.8	70	—	20	—	350.7+356.4	40	—	—	—

目前FT-Raman光谱仪大都采用Nd：YAG激光器，即掺钕的钇-铝柘榴石激光器（Yttrium Aluminum Garnet doped with Neodymium Luser），红宝石激光器，Nd：YAG激光器，掺

钕的玻璃激光器等均属固体激光器。它们的工作方式可以是连续的，也可以是脉冲的，这类激光束的特点是输出的激光功率高，可以做得很小，很坚固，其缺点是输出激光的单色性和频率的稳定性都不如气体激光器。Nd：YAG激光器的发光粒子是钕离子Nd^{3+}，其激光波长为1.06μm，Nd：YAG激光器的突出优点是效率高，阈值低，很适合于用作连续工作的器件，其输出功率可达几千瓦。固体激光器都是采用光泵浦的方式产生激光，早期使用的光泵为闪光灯光泵（flash lamp pump)，如高压氪灯光泵（high-pressure krypton lamp)。这类光泵的激光器效率低，寿命短，目前已采用二极管光泵固体Nd：YAG激光器。激光波长可以从1064nm调到1300nm，以进一步降低荧光样品的荧光干扰。在光谱范围的另一端，特别是对共振拉曼的研究来说需要使用紫外激光系统。共振拉曼光谱技术和非线性拉曼光谱技术要求激发光源频率可调。染料激光器产品情况见文献［12]。

2. 外光路系统

外光路系统是从激发光源后面到单色仪前面的一切设备，它包括聚焦透镜，多次反射镜，试样台，退偏器等。其中试样台的设计是最重要的一环，激光束照射在试样上有两种方式，一种是90°的方式，另一种是180°的同轴方式，90°方式可以进行极准确的偏振测定，能改进拉曼与瑞利两种散射的比值，使低频振动测量较容易。180°方式可获得最大的激发效率，适于浑浊和微量样品测定。两者相比，90°方式比较有利，一般仪器都采用90°方式，亦有采用两种方式。Spex Ramalog光谱仪的外光路系统见图21-8[9]。

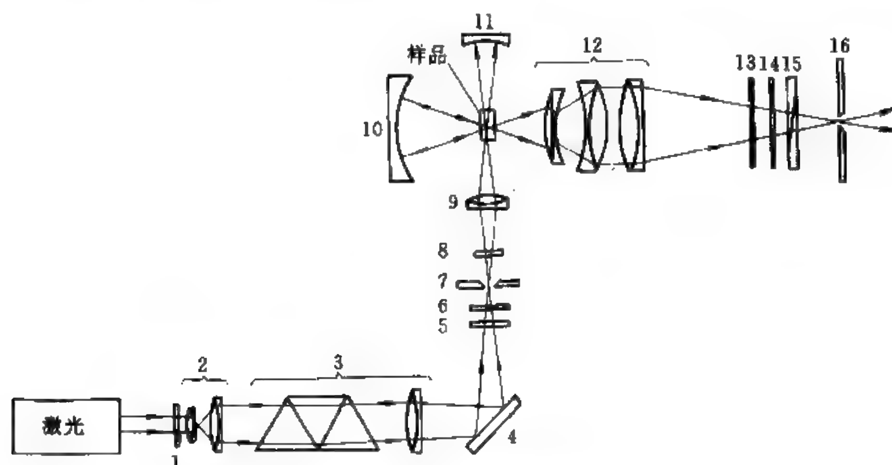


图 21-8　外光路系统

1—旋转偏振面的光学元件；2—加宽光束截面的光学元件；3—消除来自激光束的非激光线的棱镜装置；
4—平面镜；5—中性滤光片；6—干涉滤光片；7　狭缝；8—防护滤光片；9—显微镜物镜；
10—凹面准直镜；11—凹面镜；12—将散射辐射聚焦于单色器进口狭缝的一组物镜；
13—检偏振器；14—长波通滤波器；15—消偏振镜；16—单色进口狭缝

上述外光路系统仅是一个例子，各种激光拉曼光谱仪各有特点，这个部分的变化较多，许多改进装置往往是测试工作者自行设计的。

3. 单色器，瑞利散射光学过滤器和迈克尔逊干涉仪

在色散型激光拉曼光谱仪中要求单色器的杂散光最小和色散性好。为降低瑞利散射及杂散光，通常使用双光栅或三光栅组合的单色器；使用多光栅必然要降低光通量，目前大都使用平面全息光栅；若使用凹面全息光栅，可减少反射镜，提高光的反射效率。两种单色器的结构示意图如图21-9，图21-10所示[9]。图21-9是双光栅的单色器，图21-10是三光栅单色器。

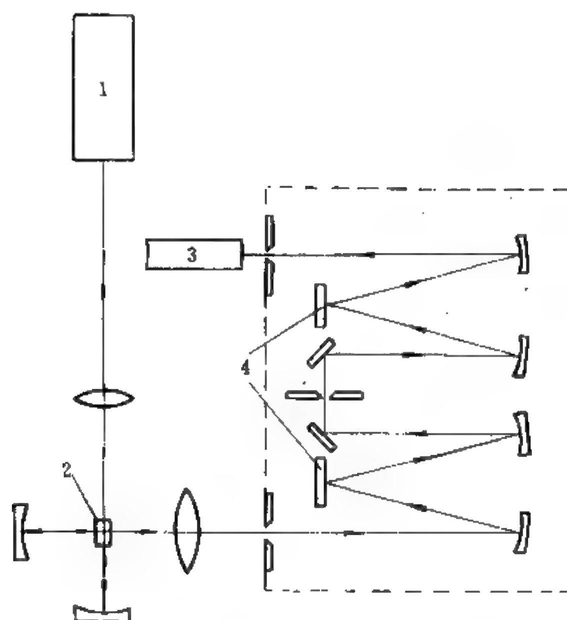


图 21-9 双光栅单色器

1—激光器；2—样品；3—检测器；4—衍射光栅

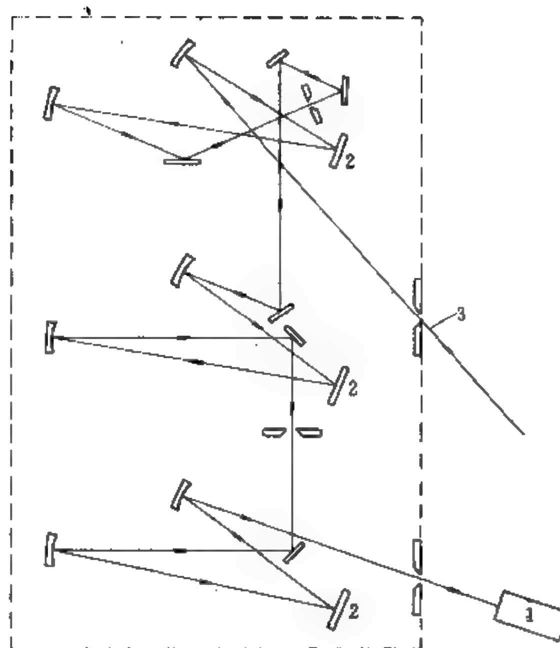


图 21-10 三光栅单色器

1—检测器；2—衍射光栅；3—散射光束

在 FT-Raman 光谱仪中，在散射光到达检测器之前，必须用光学过滤器将其中的瑞利散射滤去，至少降低 3 到 7 个数量级，否则拉曼散射光将“淹没”在瑞利散射中。光学过滤器的性能是 FT-Raman 光谱仪检测波数范围，特别是低波数区和信噪比好坏的一个关键因素。常见的光学过滤器有 Chevron 过滤器，介电（Dielectric）过滤器，它们的波数范围在（3600～100）cm^{-1}；Notch 过滤器的 Stokes 范围在（3600～50）cm^{-1}，而 antistokes 范围在（100～2000）cm^{-1}。掺铟的 CdTe 光学过滤器配合 Ta：Sa 激发光源及宽带检测器，低波数可达 30cm^{-1}。

在 FT-Raman 光谱仪中使用的干涉仪与 FTIR 相同，其中分束器一般为多层镀 Si 的 CaF_2 分束器或镀 Fe_2O_3 的 CaF_2 分束器，也有用石英分束器及扩展范围的 KBr 分束器。固定镜和动镜在专用 FT-Raman 光谱仪中，表面均镀金，它对近红外的反射效率高，动镜驱有无摩擦电磁驱动及气动轴承两种，并具有动态调整功能，有的仪器具有步进扫描功能，可进行时间分辨拉曼光谱的测定。

4. 检测和记录系统

对于落在可见区的拉曼散射光，可用光电倍增管作为检测器，对其要求是：量子效率要高（量子效率是指光阴极每秒出现的信号脉冲与每秒到达光阴极的光子数之比值），热离子暗电流小（热离子暗电流是在光束断绝后阴极产生的一些热激发电子）。常用光电倍增管的商品型号见表 21-3。

光电倍增管的输出脉冲数一般有四种方法检出：直流放大，同步检出，噪声电压测定和脉冲计数法，脉冲计数法是最常用的一种。

在 FT-Raman 光谱仪中，常用的检测器为 Ge 或 InGaAs 检测器。图 21-11 给出了 Ge，InGaAs 及 Si 检测器对不同波长近红外光的响应曲线[6]。由图可知：Ge 检测器在液氮温度下，它的检测范围在高波数区可达 3400cm^{-1} 拉曼位移；InGaAs 检测器在室温下高波数区可达

3600cm^{-1}，用液氮冷却可降低噪声，但高波数区只能到 3000cm^{-1}拉曼位移；Si 检测器低温下检测范围较窄，但在反斯托克斯区的响应良好。为保持检测器良好的信噪比和稳定性，检测器需要用液氮预冷 1h 左右后再用。

表 21-3 常见光电检测器的型号及其波长范围

检测器类别	型 号	产地	λ/nm	检测器类别	型 号	产地	λ/nm
光电倍增管	GDB-23	国产	300～850 灵敏区在 400±20	光电倍增管	RCA-1P28	美国	200～650
	GDB-28B	国产	400～1200 灵敏区在 800±100		RCA-6217	美国	330～800
	GD-5	国产	200～625		RCA-7102	美国	400～1000
	GD-6	国产	625～1000		FW-118	美国	320～1000
	MS-9S	日本	300～650		EMI-9592B	英国	190～800
	MS-9SY	日本	190～650		EMI-5952B	英国	200～800
	R-106	日本	160～650		EMI-6256	英国	165～670
	R-456	日本	165～900		EMI-9558θ	英国	165～850
	RCA-1P21	美国	300～600		ФЭУ-18	原苏联	220～680

FT-Raman 光谱仪的数据系统由于采用了傅里叶变换技术，对计算机的内存和计算速度有更高的要求，它的光谱数据处理功能既具有色散型拉曼光谱仪所具有的如基线校正，平滑，多次扫描平均及拉曼位移的转换等功能，还能进行光谱减法，光谱检索，导数光谱，退卷积分，曲线拟合和因子分析等数据处理功能。

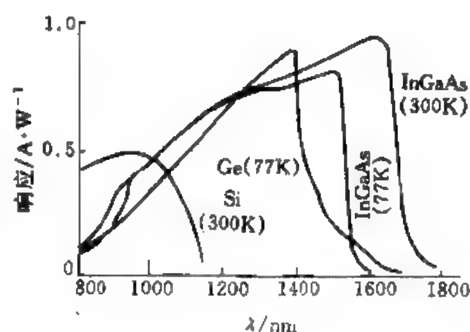


图 21-11 不同检测器响应特征曲线

三、拉曼光谱仪的校正

1. 波数精度与波数重现性

可根据已发表的氩、氪离子激光器的标准荧光谱线和低压氖、氩灯的标准发射谱线对拉曼光谱仪的波数精度和波数重现性进行校正。

表 21-4 给出了氩离子激光器的标准荧光谱线[13]。

表 21-4 氩离子激光器的标准荧光谱线

来源	相对强度	λ（空气）/cm^{-1}	波数（真空）/cm^{-1}	相对于 488.0nm 位移	相对于 514.5nm 位移
Ar^+	5000	487.9860	20486.67	0	
Ar^+	200	488.9033	20448.23	38.4	
Ar^+	130	490.4753	20382.70	104.0	
Ar^+	970	493.3206	20265.13	221.5	
Ar^+	14	494.2915	20225.33	261.3	
Ar^+	10	495.5111	20175.53	311.1	
Ar^+	960	496.5073	20135.07	351.6	
Ar^+	330	497.2157	20106.39	380.3	
Ar^+	1500	500.9334	19957.16	529.5	
Ar^+	620	501.7160	19926.03	560.6	
Ar^+	1400	506.2036	19749.39	737.3	
Ar^+	10	509.0496	19638.98	847.7	
Ar^+	360	514.1790	19443.06	1043.6	
Ar^+	1000	514.5319	19429.73	1056.9	0
Ar^+	8	516.2745	19364.14	1122.5	65.6
Ar^+	38	516.5774	19352.79	1133.9	76.9
Ar^+	41	517.6233	19313.69	1173.0	116.0
Ar^+	20	521.6816	19163.44	1323.2	266.3

续表

来源	相对强度	λ（空气）/ cm^{-1}	波数（真空）/ cm^{-1}	相对于 488.0nm 位移	相对于 514.5nm 位移
Ar^+	150	528.6895	18909.43	1577.2	520.3
Ar^+	12	530.5690	18842.45	1644.2	587.3
Ar^+	18	539.7522	18521.87	1964.8	907.9
Ar^+	11	540.2604	18504.45	1982.2	925.3
Ar^+	12	540.7348	18488.21	1998.5	941.5
Ar^+	19	545.4307	18329.04	2157.6	1100.7
Ar	14	549.5876	18190.47	2296.2	1239.3
Ar^+	14	549.8185	18182.76	2303.9	1247.0
Ar^+	14	550.0334	18175.66	2311.0	1254.1
Ar^+	22	555.4050	17999.88	2486.8	1429.8
Ar	30	555.87031	17984.81	2501.9	1444.9
Ar	12	557.25428	17940.15	2546.5	1489.6
Ar^+	18	557.7689	17923.59	2563.1	1506.1
Ar^+	11	557.8518	17920.93	2565.7	1508.8
Ar	48	560.67341	17830.75	2655.9	1599.0
Ar^+	14	562.5684	17770.69	2716.0	1659.0
Ar^+	14	563.5882	17738.53	2748.1	1691.2
Ar	29	565.07054	17692.00	2794.7	1737.7
Ar^+	27	565.4450	17680.28	2806.4	1749.4
Ar^+	22	567.2952	17622.62	2864.1	1807.1
Ar^+	27	569.1650	17564.73	2921.9	1865.0
Ar^+	23	572.4325	17464.47	3022.2	1965.3
Ar	16	573.95207	17418.23	3068.4	2011.5
Ar^+	69	577.2326	17319.24	3167.4	2110.5
Ar^+	16	578.6560	17276.63	3210.0	2153.1
Ar^+	49	581.2746	17198.80	3287.9	2230.9
Ar^+	18	584.3781	17107.47	3379.2	2322.3
Ar^+	12	587.0443	17029.77	3456.9	2400.0
Ar	11	588.26250	16994.50	3492.2	2435.2
Ar	18	588.85851	16977.31	3509.4	2452.4
Ar	38	591.20861	16909.81	3576.9	2519.9
Ar	10	592.88124	16862.11	3624.6	2567.6
Ar^+	11	595.0905	16799.51	3687.2	2630.2
Ar^+	23	598.5920	16701.24	3785.4	2728.5
Ar^+	20	598.9339	16691.71	3795.0	2738.0
Ar	57	603.21291	16573.30	3913.4	2856.4
Ar	37	604.32254	16542.87	3943.8	2886.9
Ar^+	14	604.4468	16539.47	3947.2	2890.3
Ar^+	14	604.6894	16532.84	3953.8	2896.9
Ar^+	14	604.9072	16526.89	3959.8	2902.8
Ar	15	605.93735	16498.79	3987.9	2930.9
Ar^+	11	607.7431	16449.77	4036.9	2980.0
Ar^+	91	610.3546	16379.38	4107.3	3050.4
Ar^+	>1750	611.4929	16348.90	4137.8	3080.8
Ar^+	100	612.3368	16326.36	4160.3	3103.4
Ar^+	97	613.8660	16285.69	4201.0	3144.0
Ar^+	1400	617.2290	16196.96	4289.71	3232.8
Ar^+	26	618.7136	16158.10	4328.6	3271.6
Ar^+	26	623.9713	16021.95	4464.7	3407.8
Ar^+	590	624.3125	16013.19	4473.5	3416.5
Ar^+	16	632.4414	15807.37	4679.3	3622.4
Ar	11	638.47189	15658.07	4828.6	3771.7
Ar^+	14	639.6614	15628.95	4857.7	3800.8
Ar^+	160	639.9215	15622.60	4864.1	3807.1
Ar	50	641.63075	15580.98	4905.7	3848.8
Ar^+	27	643.7604	15529.44	4957.2	3900.3
Ar^+	22	644.1908	15519.06	4967.6	3910.7
Ar^+	16	644.3858	15514.36	4972.3	3915.4

表 21-5～表 21-8 给出了用于拉曼光谱仪的波数精度校正的氪离子激光器的标准荧光谱线以及这些谱线相对于激光波长的位移。

表 21-5　Kr^+激光器的标准荧光谱线（一）[14]

线　号	发射线频率（真空中）/ cm^{-1}	λ（空气中）/ nm	相对峰高	发射线的表观拉曼位移/cm^{-1}			
				408.7nm	413.1nm	415.4nm	461.9nm
1	24 682	405.04	50				
2	24 642	405.70	300				
3	24 593	406.51	300				
4	24 579	406.74	1000	0			
5	24 453	408.83	500	126			
6	24 391	409.87	250	188			
7	24 329	410.92	100	250			
8	24 199	413.13	1000	380	0		
9	24 153	413.91	100	426	46		
10	24 118	414.51	250	461	81		
11	24 064	415.45	800	515	135	0	
12	23 964	417.18	950	615	235	100	
13	23 888	418.51	50	691	311	176	
14	23 653	422.65	700	926	546	411	
15	23 597	423.66	100	982	602	467	
16	23 520	425.06	150	1059	679	544	
17	23 508	425.27	50	1071	691	556	
18	23 496	425.48	100	1083	703	568	
19	23 471	425.94	80	1108	728	593	
20	23 420	426.86	60	1159	779	644	
21	23 288	429.29	600	1291	911	776	
22	23 247	430.05	200	1332	952	817	
23	23 153	431.78	500	1426	1046	911	
24	23 126	432.30	150	1453	1073	938	
25	23 082	433.12	80	1497	1117	982	
26	23 071	433.33	50	1508	1128	993	
27	22 953	435.55	3000	1626	1246	1111	
28	22 878	436.97	200	1701	1321	1186	
29	22 817	438.15	100	1762	1382	1247	
30	22 791	438.65	300	1788	1408	1273	
31	22 716	440.09	100	1863	1483	1348	
32	22 604	442.27	100	1975	1595	1460	
33	22 558	443.17	500	2021	1641	1506	
34	22 533	443.68	600	2046	1666	1531	
35	22 499	444.33	850	2080	1700	1565	
36	22 450	445.32	50	2129	1749	1614	
37	22 397	446.37	750	2182	1802	1667	
38	22 340	447.50	800	2239	1859	1724	
39	22 306	448.18	50	2273	1893	1758	
40	22 266	448.99	400	2313	1933	1798	
41	22 103	452.31	400	2476	2096	1961	
42	21 940	455.66	200	2639	2259	2124	
43	21 840	457.72	100	2739	2359	2224	
48	21 661	461.53	500	2918	2538	2403	
49	21 643	461.92	1000	2936	2556	2421	0
50	21 574	463.39	800	3005	2625	2490	69
51	21 498	465.02	40	3081	2701	2566	145

表 21-6　Kr^+激光器的标准荧光谱线（二）[14]

线　号	发射线频率（真空中）/ cm^{-1}	λ（空气中）/ nm	相对峰高	发射线的表观拉曼位移/cm^{-1}						
				461.9nm	468.0nm	476.2nm	482.5nm	501.6nm	502.2nm	530.9nm
49	21 643	461.92	1000	0						
50	21 574	463.39	800	69						
51	21 498	465.02	40	145						

续表

线　号	发射线频率（真空中）/ cm^{-1}	λ（空气中）/ nm	相对峰高	发射线的表观拉曼位移/cm^{-1}						
				461.9nm	468.0nm	476.2nm	482.5nm	501.6nm	502.2nm	530.9nm
52	21 458	465.89	850	185						
53	21 360	468.04	600	283	0					
54	21 310	469.13	270	333	50					
55	21 296	469.44	380	347	64					
56	21 095	473.90	2300	548	265					
57	21 038	474.20	90	605	322					
58	20 991	476.57	1320	652	369	0				
59	20 977	476.57	3500	666	383	14				
60	20 843	479.63	70	800	517	134				
61	20 799	480.60	150	844	561	178				
62	20 776	481.18	800	867	584	201				
63	20 718	482.52	950	925	642	259	0			
64	20 689	483.21	2000	954	671	288	29			
65	20 659	483.66	80	984	701	318	59			
66	20 627	484.66	2400	1016	733	364	91			
67	20 582	485.72	600	1061	778	409	136			
68	20 484	488.04	80	1159	876	507	234			
69	20 336	491.59	120	1307	1024	655	382			
70	20 215	494.56	500	1428	1145	776	503			
71	20 203	494.85	80	1440	1157	788	515			
72	20 155	496.03	140	1488	1205	836	563			
73	20 079	497.89	130	1564	1281	912	639			
74	20 062	498.28	100	1581	1298	929	656			
75	19 957	500.90	80	1686	1403	1034	761			
76	19 942	501.33	600	1701	1418	1049	776			
77	19 929	501.65	100	1714	1431	1062	789	0		
78	19 906	502.24	2000	1737	1454	1085	812	23		
79	19 882	502.84	70	1761	1478	1109	836	47		
80	19 860	503.38	200	1783	1500	1131	858	69		
81	19 811	504.63	130	1832	1549	1180	907	118		
82	19 779	505.45	100	1864	1581	1212	939	150		
83	19 709	507.25	230	1934	1651	1282	1009	220		
84	19 691	507.72	250	1952	1669	1300	1027	238		
85	19 655	508.65	470	1988	1705	1336	1063	274		
86	19 504	512.57	800	2139	1856	1487	1214	425		
87	19 439	514.30	140	2204	1921	1552	1279	490		
88	19 351	516.68	670	2292	2009	1640	1367	578		
89	19 345	516.80	180	2298	2015	1646	1373	584		
90	19 274	518.70	320	2369	2086	1717	1444	655		
91	19 225	520.02	400	2418	2135	1766	1493	704		
92	19 195	520.83	2500	2448	2165	1796	1523	734	0	
93	19 165	521.60	350	2478	2195	1826	1553	764	30	
94	19 134	522.49	20	2507	2224	1855	1582	793	59	
95	19 117	522.95	600	2526	2243	1874	1601	812	78	
96	18 947	527.65	220	2696	2413	2044	1771	982	248	
97	18 832	530.87	2300	2811	2528	2159	1886	1097	363	0
98	18 782	532.28	200	2861	2578	2209	1936	1147	413	50
99	18 744	533.34	2000	2899	2616	2247	1974	1185	451	88
100	18 698	534.68	300	2945	2662	2293	2020	1231	497	134
101	18 667	535.55	80	2976	2693	2324	2051	1262	528	165
102	18 450	541.84	200	3193	2910	2541	2268	1479	745	382
103	18 382	543.86	400	3261	2978	2607	2336	1547	813	450
104	18 356	544.63	900	3287	3004	2633	2362	1573	839	476
105	18 282	546.82	1100	3363	3080	2709	2438	1647	913	550
106	18 178	549.95	450	3467	3184	2813	2542	1751	1017	654

表 21-7　Kr^+激光器的标准荧光谱线（三）[14]

线　号	发射线频率（真空中）/cm^{-1}	λ(空气中)/nm	相对峰高	发射线的表观拉曼位移/cm^{-1}			
				501.6nm	520.2nm	530.8nm	568.2nm
107	18 101	552.29	1050	1828	1094	731	
108	18 003	555.30	400	1926	1192	829	
109	17 973	556.22	200	1956	1222	859	
110	17 953	556.86	1000	1976	1242	879	
111	17 947	557.03	550	1982	1248	885	
112	17 741	563.50	1400	2188	1454	1091	
113	17693	565.04	250	2236	1502	1139	
114	17 632	566.99	300	2297	1563	1200	
115	17 623	567.28	570	2306	1572	1209	
116	17 618	567.45	400	2311	1577	1214	
117	17 595	568.19	3500	2334	1600	1237	0
118	17 569	569.03	2000	2360	1626	1263	26
119	17 557	569.41	400	2372	1638	1275	38
120	17 539	569.98	400	2390	1656	1293	56
121	17 486	571.72	180	2443	1709	1346	109
122	17 377	575.30	1000	2552	1818	1455	218
123	17 322	577.14	1700	2607	1873	1510	273
124	17 302	577.80	400	2727	1893	1530	293
125	17 059	586.07	270	2870	2136	1773	536
126	17 028	587.09	750	2901	2167	1804	567
127	16 911	591.17	110	3018	2284	1921	684
128	16 753	596.75	100	3176	2442	2079	842
129	16 684	599.22	1000	3245	2511	2148	911
130	16 634	601.00	90	3295	2561	2198	961
131	16 600	602.24	200	3329	2595	2232	995
132	16 560	603.72	10	3489	3755	2392	1155
133	16 404	609.45	50	3525	2791	2428	1191
134	16 337	611.96	70	3592	2858	2495	1258
135	16 207	616.88	160	3722	2988	2625	1388
136	15 860	630.37	160	4069	3335	2972	1735
137	15 837	631.28	10	4092	3358	2995	1758
138	15 642	639.11	100	4287	3553	3190	1953
139	15 597	640.98	70	4332	3598	3235	1998
140	15 581	641.66	150	4348	3614	3251	2014
141	15 572	624.02	700	4357	3623	3260	2023
142	15 451	647.09	250	4478	3744	3381	2144

表 21-8　Kr^+激光器的标准荧光谱线（四）[14]

线　号	发射线频率（真空中）/cm^{-1}	λ(空气中)/nm	相对峰高	发射线的表观拉曼位移/cm^{-1}				
				647.1nm	676.4nm	687.1nm	752.4nm	799.3nm
142	15 451	647.09	250	0				
143	15 354	651.09	430	97				
144	15214	657.01	1000	236				
145	15 141	660.30	160	310				
146	15 090	662.50	30	360				
147	15 082	662.86	160	368				
148	15 067	623.50	110	383				
149	15 046	664.45	100	405				
150	15 028	665.25	100	423				
151	14 995	668.40	60	495				
152	14 779	676.44	330	671	0			
153	14 764	677.12	100	686	15			
154	14 550	687.08	110	900	229	0		
155	14 397	694.41	30	1053	382	153		
156	14 132	707.40	100	1318	647	418		
157	14 002	713.40	170	1448	777	548		
158	13 859	721.31	600	1590	919	690		

续表

线号	发射线频率(真空中)/cm⁻¹	λ(空气中)/nm	相对峰高	发射线的表观拉曼位移/cm⁻¹				
				647.1nm	676.4nm	687.1nm	752.4nm	799.3nm
159	13 714	728.98	900	1736	1065	836		
160	13 679	731.05	80	1771	1100	871		
161	13 624	733.78	60	1827	1156	927		
162	13 580	736.16	90	1871	1200	971		
163	13 559	737.30	60	1894	1223	994		
164	13 497	740.70	800	1953	1282	1053		
165	13 444	743.58	400	2006	1335	1106		
166	13 430	744.38	150	2020	1349	1120		
167	13 353	748.68	280	2097	1426	1197		
168	13 341	749.36	180	2109	1438	1209		
169	13 307	751.26	400	2144	1473	1244		
170	13 286	752.45	600	2164	1493	1264	0	
171	13 231	755.57	180	2220	1549	1320	56	
172	13 214	756.54	250	2237	1566	1337	73	
173	13 175	758.74	550	2274	1603	1374	110	
174	13 151	760.15	600	2299	1628	1399	135	
175	13 008	768.52	400	2442	1771	1542	278	
176	12 992	769.45	250	2458	1787	1558	294	
177	12 923	773.57	200	2528	1857	1628	364	
178	12 898	775.07	200	2553	1882	1653	389	
179	12 834	778.94	130	2617	1946	1717	453	
180	12 796	781.25	250	2655	1984	1755	491	
181	12 774	782.60	450	2677	2006	1777	513	
182	12 758	783.58	190	2693	2022	1793	529	
183	12 750	784.07	520	2701	2030	1801	537	
184	12 727	785.48	500	2724	2053	1824	560	
185	12 644	790.76	120	2807	2136	1907	643	
186	12 636	791.01	190	2813	2142	1913	649	
187	12 631	791.45	70	2820	2149	1920	656	
188	12 604	793.14	130	2847	2176	1947	683	
189	12 537	797.36	100	2914	2243	2014	750	
190	12 507	799.32	700	2944	2273	2044	780	0
191	12 499	799.80	300	2952	2281	2050	788	8
192	12 467	801.86	110	2984	2313	2084	820	40
193	12 404	805.95	600	3047	2376	2147	883	103
194	12 379	807.50	100	3072	2401	2172	908	128
195	12 359	808.80	550	3092	2421	2192	928	148
196	12 335	810.44	700	3116	2445	2216	952	172
197	12 322	811.29	1500	3129	2468	2229	965	185
198	12 296	813.00	700	3155	2484	2255	991	211
199	12 289	813.40	200	3162	2491	2262	998	218
200	12 282	813.90	100	3169	2498	2269	1005	225
201	12 273	814.51	300	3178	2507	2278	1014	234
202	12 225	817.70	700	3226	2555	2326	1062	282
203	12 206	819.00	600	3245	2574	2345	1081	301
204	12 187	820.27	600	3264	2593	2364	1100	320
205	12 179	820.80	550	3272	2601	2372	1108	328
206	12 156	822.90	500	3295	2624	2395	1131	351
207	12 098	826.32	700	3353	2682	2453	1189	409
208	12 072	828.10	600	3379	2708	2479	1215	435
209	12 059	828.90	600	3392	2721	2492	1228	448
210	12 047	829.81	600	3404	2733	2504	1240	460
211	11 945	836.90	200	3506	2835	2606	1342	562
212	11 883	841.25	50	3568	2897	2668	1404	624
213	11 848	843.80	80	3603	2932	2703	1439	659
214	11 799	847.33	200	3652	2981	2752	1488	708
215	11 759	850.20	400	3692	3021	2792	1528	748
216	11 749	850.89	450	3702	3031	2802	1538	758
217	11 736	851.86	85	3715	3044	2815	1551	771
218	11 711	853.68	180	3740	3069	2840	1576	796

表 21-9 给出用于以氩离子激光器作激发光源的拉曼光谱仪校正的低压氖灯的标准发射谱线。

表 21-9 低压氖灯的标准发射谱线[15]

线号	λ(空气)/nm	σ(空气)/cm⁻¹	相对于488.0nm位移/cm⁻¹	相对于514.5nm位移/cm⁻¹	线号	λ(空气)/nm	σ(空气)/cm⁻¹	相对于488.0nm位移/cm⁻¹	相对于514.5nm位移/cm⁻¹
Ar^+	487.9860	20,492.39			56	556.27662	17,976.67	2515.72	1458.47
1	488.49170	20,471.18	21.21		57	565.25664	17,691.08	2801.31	1744.06
2	489.21007	20,441.12	51.27		58	565.66588	17,678.28	2814.11	1756.86
3	492.8241	20,291.22	201.17		59	566.25489	17,659.89	2832.50	1775.25
4	493.90457	20,246.83	245.56		60	568.98163	17,575.26	2917.13	1859.88
5	494.49899	20,222.49	269.90		61	571.92248	17,484.89	3007.50	1950.25
6	495.70355	20,173.35	319.04		62	574.82985	17,396.45	3095.94	2038.69
7	495.7123	20,172.99	319.40		63	576.05885	17,359.34	3133.05	2075.80
8	499.4913	20,020.37	472.02		64	576.44188	17,347.80	3144.59	2087.34
9	500.51587	19,979.39	513.00		65	580.44496	17,228.16	3264.23	2206.98
10	501.1	19,956.10	536.29		66	581.14066	17,207.54	3284.85	2227.60
11	502.2864	19,908.96	583.43		67	582.01558	17,181.67	3310.72	2253.47
12	503.13504	19,875.38	617.01		68	585.24878	17,086.75	3405.64	2348.39
13	503.77512	19,850.13	642.26		69	586.84183	17,040.37	3452.02	2394.77
14	507.42007	19,707.54	784.85		70	587.28275	17,027.57	3465.07	2407.57
15	508.03852	19,683.55	808.84		71	588.18950	17,001.32	3491.07	2433.82
16	510.47011	19,589.79	902.60		72	590.24623	16,942.08	3550.31	2493.06
17	511.36724	19,555.42	936.97		73	590.27835	16,941.16	3551.23	2493.98
18	511.65032	19,544.60	947.79		74	590.64294	16,930.70	3561.69	2504.44
19	512.22565	19,522.65	969.74		75	591.36327	16,910.08	3582.31	2525.06
20	514.49384	19,436.58	1055.81		76	591.89068	16,895.01	3597.38	2540.13
Ar^+	514.5319	19,435.14			77	594.48342	16,821.33	3671.06	2613.81
21	515.19610	19,410.08	1082.31	25.06	78	596.16228	16,773.96	3718.43	2661.18
22	515.44271	19,400.80	1091.59	34.34	79	596.54710	16,763.14	3729.25	2672.00
23	515.66672	19,392.37	1100.02	42.77	80	597.46273	16,737.45	3754.94	2697.69
24	515.89018	19,383.97	1108.42	51.17	81	597.55340	16,734.91	3757.48	2700.23
25	518.86122	19,272.98	1219.41	162.16	82	598.79074	16,700.33	3792.06	2734.81
26	519.13223	19,262.91	1229.48	172.23	83	599.16532	16,689.88	3802.51	2745.26
27	519.31302	19,256.21	1236.18	178.93	84	600.09275	16,664.09	3828.30	2771.05
28	519.32227	19,255.87	1236.52	209.27	85	602.99971	16,583.76	3908.63	2851.38
29	520.38962	19,216.37	1276.02	218.77	86	604.61348	16,539.49	3952.90	2895.65
					87	606.45359	16,489.31	4003.08	2945.83
30	520.88648	19,198.04	1294.35	237.10	88	607.43377	16,462.70	4029.69	2972.44
31	521.05672	19,191.77	1300.62	243.37	89	609.61630	16,403.76	4088.63	3031.38
32	521.43389	19,177.89	1314.50	257.25	90	612.84498	16,317.34	4175.05	3117.80
33	522.23517	19,148.46	1343.93	286.68	91	614.30623	16,278.53	4213.86	3156.61
34	523.40271	19,105.75	1386.64	329.39	92	616.35939	16,224.30	4268.09	3210.84
35	527.40393	18,960.80	1531.59	474.34	93	617.48829	16,194.64	4297.75	3240.50
36	528.00853	18,939.09	1553.30	496.05	94	618.21460	16,175.61	4316.78	3259.53
37	529.81891	18,874.37	1618.02	560.77	95	618.90649	16,157.53	4334.86	3277.61
38	530.47580	18,851.00	1641.39	584.14	96	619.30663	16,147.09	4345.30	3288.05
39	532.63968	18,774.42	1717.97	660.72	97	620.57775	16,114.02	4378.37	3321.12
40	533.07775	18,758.99	1733.40	676.15	98	621.38758	16,093.02	4399.37	3342.12
41	534.10938	18,722.76	1769.30	712.38	99	621.72813	16,084.20	4408.19	3350.94
42	534.32834	18,715.08	1777.31	720.06	100	624.67294	16,008.38	4484.01	3426.76
43	534.92038	18,694.37	1798.02	740.77	101	626.64950	15,957.88	4534.51	3477.26
44	536.00121	18,656.67	1835.72	778.47	102	629.37447	15,888.79	4603.60	3546.35
45	537.23110	18,613.96	1878.43	821.18	103	630.47892	15,860.96	4631.43	3574.18
46	537.49774	18,604.73	1887.66	830.41	104	631.36921	15,838.59	4653.80	3596.55
47	538.32503	18,576.14	1916.25	859.00	105	632.81646	15,802.37	4690.02	3632.77
48	540.05616	18,516.59	1975.80	918.55	106	633.44279	15,786.75	4705.64	3648.39
49	541.26490	18,475.24	2017.15	959.90	107	635.18618	15,743.42	4748.97	3691.72
50	541.85584	18,455.09	2037.30	980.05	108	638.29914	15,666.64	4825.75	3768.50
51	543.36513	18,403.83	2088.56	1031.31	109	640.22460	15,619.52	4872.87	3815.62
52	544.85091	18,353.64	2138.75	1081.50	110	642.17108	15,572.17	4920.22	3862.97
53	549.44158	18,200.30	2292.09	1234.84	111	644.47118	15,516.60	4975.79	3918.54
54	553.36788	18,071.16	2421.23	1363.98	112	650.65279	15,369.18	5123.21	4065.96
55	553.86510	18,054.94	2437.45	1380.20	113	653.28824	15,307.18	5185.21	4127.96

图 21-12～图 21-15 给出了低压氖和氩灯的发射光谱，这些光谱可直接用于拉曼光谱仪的校正[36]。

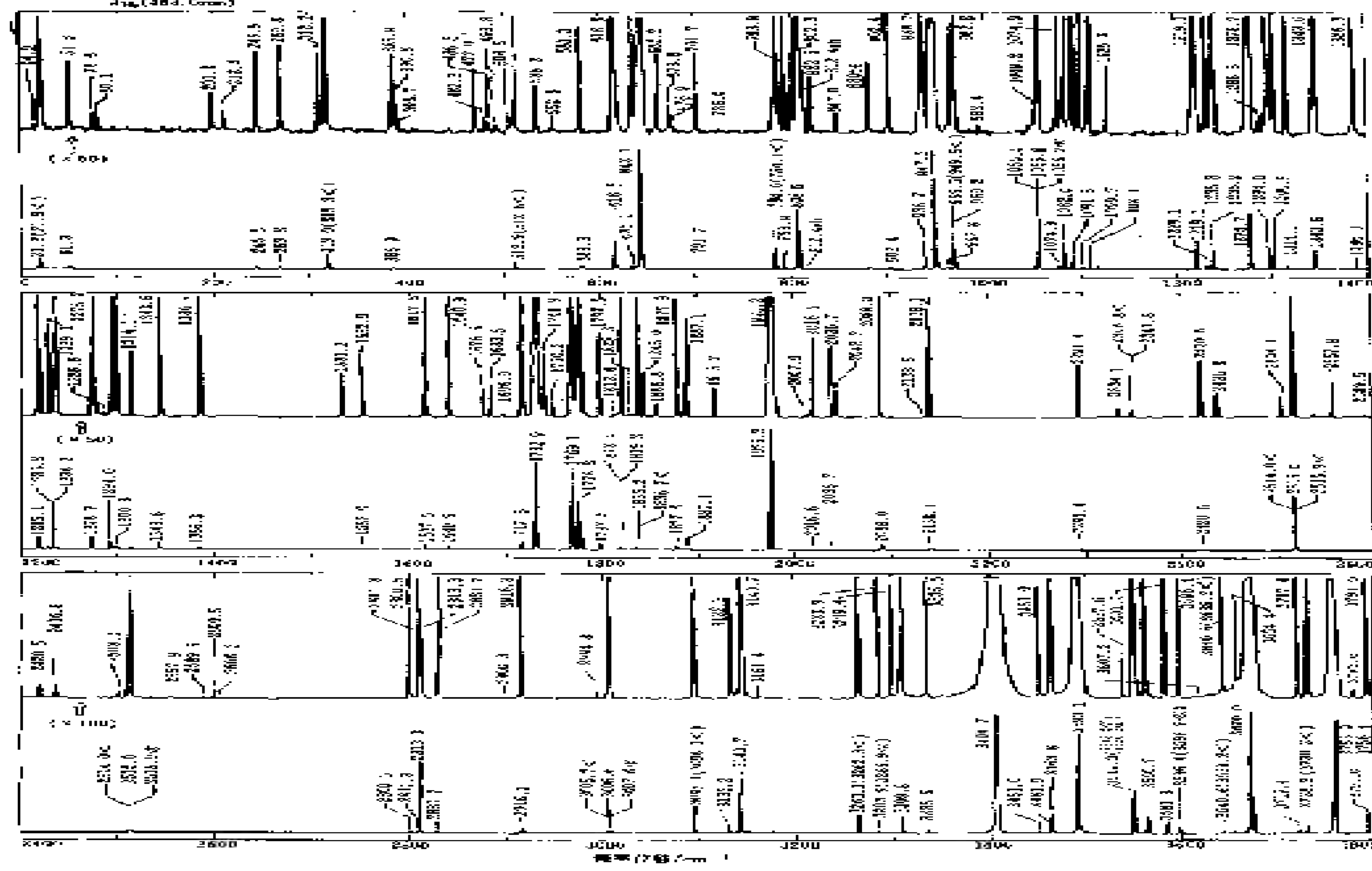


图 21-12 氖灯发射光谱

横坐标以相对于 Ar^+ 激光器 488.0nm 激发线的频率位移表示

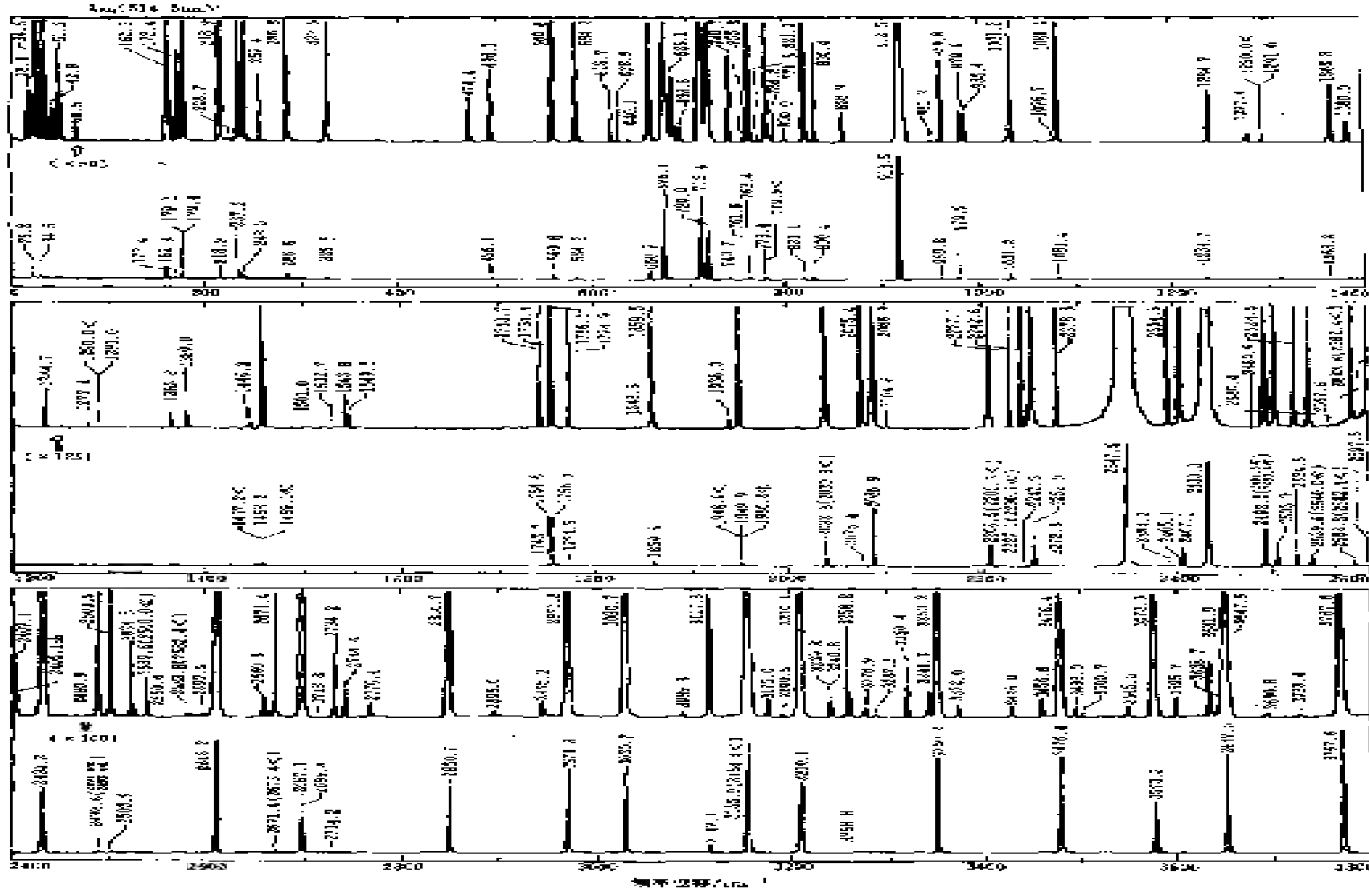


图 21-13 氖的发射光谱

频率以相对于 Ar^+ 激光器 514.5nm 激发线的频率位移表示

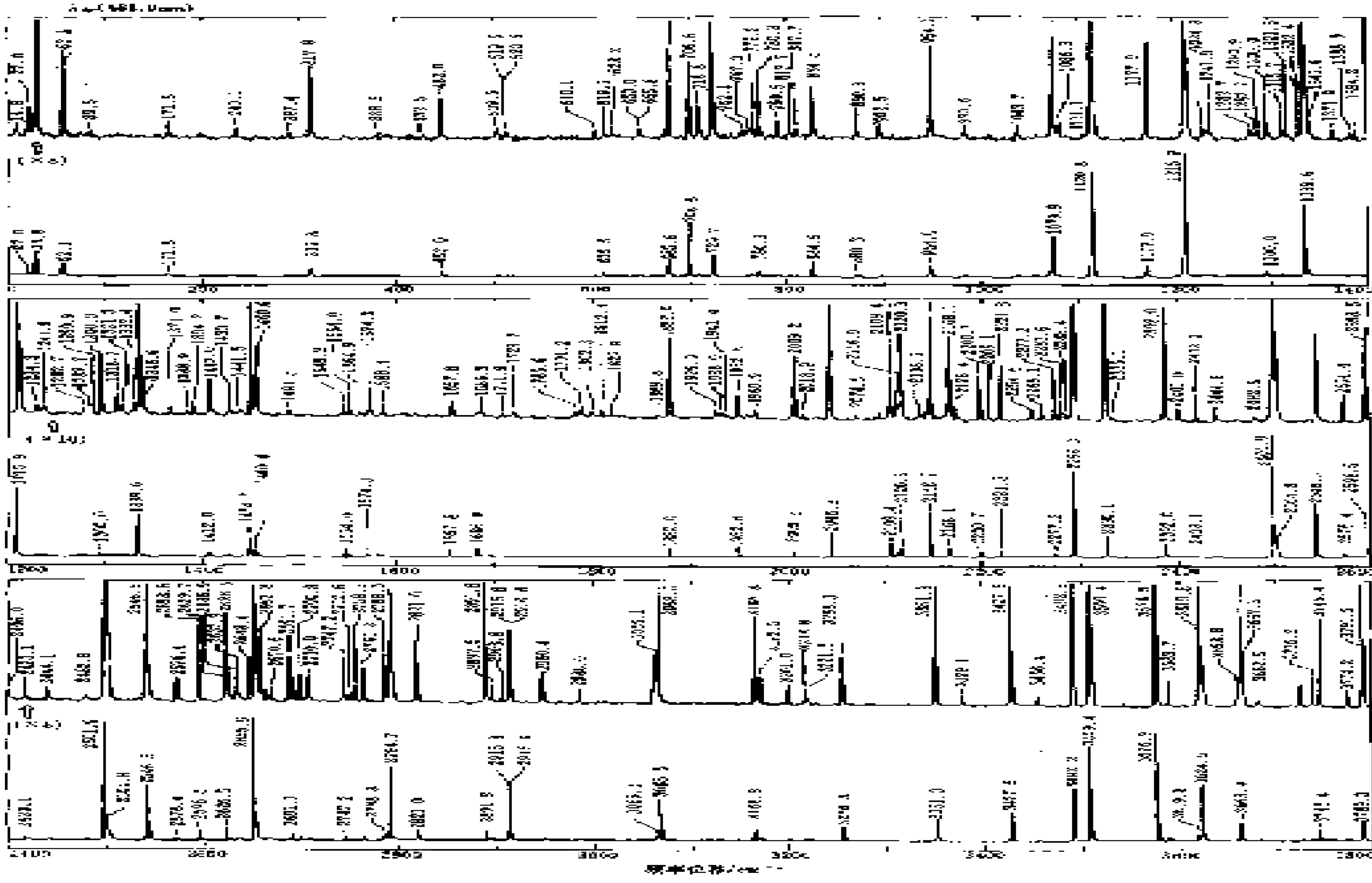


图 21-14 氩的发射光谱

频率以相对于 Ar^+ 激光器 488.0nm 激发线的频率位移表示

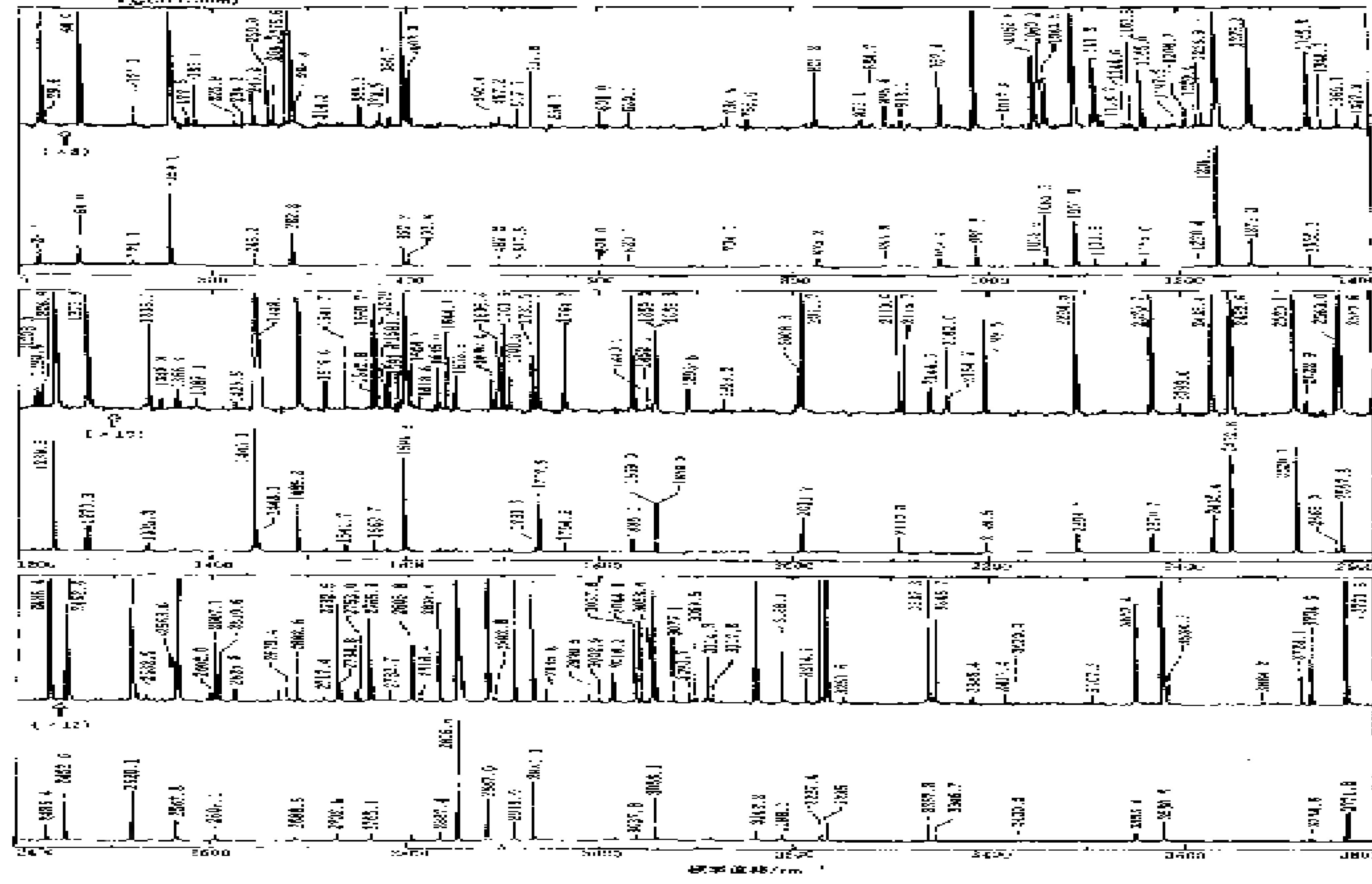


图 21-15 氩的发射光谱

频率以相对于Ar⁺激光器514.5nm激发线的拉曼位移表示

Hendra 和 Loader 以氖发射光谱为基准精确测定了茚的拉曼光谱，如图 21-16 和表 21-10 所示[17]（图中的线号与表中线号相对应）。

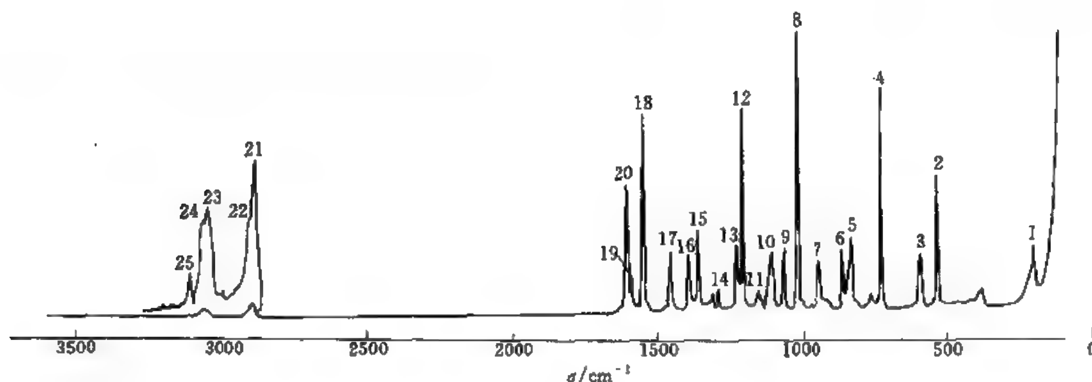


图 21-16 茚的拉曼光谱

表 21-10 茚的拉曼光谱数据[17]

线号	位置 σ/cm^{-1}	线号	位置 σ/cm^{-1}	线号	位置 σ/cm^{-1}	线号	位置 σ/cm^{-1}	线号	位置 σ/cm^{-1}
1	205.0±2	6	861.3±0.2	11	1154.5±0.5	16	1393.2±1	21	2892.2±1
2	533.7±0.5	7	947.2±0.2	12	1205.2±0.2	17	1457.8±0.5	22	2901.2±1
3	593.0±2	8	1018.6±0.2	13	1226.2±0.2	18	1553.3±0.5	23	3054.7±1
4	730.1±0.2	9	1067.9±0.2	14	1287.8±0.2	19	1589.8±1	24	3068.5±2.5
5	830.5±0.2	10	1108.9±1	15	1361.3±0.4	20	1609.6±0.2	25	3112.7±0.5

2. 分辨率的检验

严格地讲，拉曼光谱的分辨率应是 Rayleigh 标准，若两条相等强度的谱线之间的凹点至线顶峰高度为最高强度的 20%，则称此两谱线是可分辨的，它们之间的距离即为分辨率（见图 21-17[6]）。

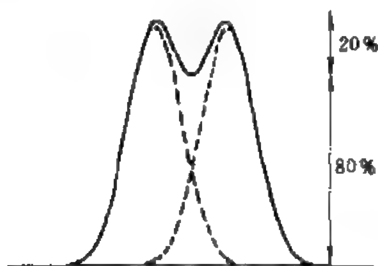


图 21-17 两重叠光谱谱带分辨率的瑞利标准

测定分辨率的方法是将汞灯或日光灯放在样品台上作为散射光源，在一定的狭缝宽度和高度，每点扫描时间和步长均相等条件下，测量 17269.2cm⁻¹谱线的半高宽，并折合成波数，它就是光谱仪的分辨率。也可以利用四氯化碳来检验 Raman 光谱仪的分辨率，CCl_4 的 459cm⁻¹谱带是多重峰，这是由于 $C\text{-}Cl^{35}$和 $C\text{-}Cl^{37}$的伸缩振动引起的。由氯同位素产生的 5 个谱带的位置列于表 21-11[17]，其谱图如图 21-18 所示。

若在所检验的仪器上所测 CCl_4 的谱图与图 21-18 完全一致，可认为该仪器的分辨率小于 1cm⁻¹。

色散型拉曼光谱仪的分辨率随狭缝的加宽而降低，但随拉曼位移的加大而增大。

表 21-11 四氯化碳的 459cm⁻¹谱带多重峰的拉曼位移

四氯化碳	含量/%	拉曼位移/cm⁻¹
$C^{37}Cl_4$	0.4	没有观察到
$C^{35}Cl^{37}Cl_3$	4.7	452.0±0.2
$C^{35}Cl_2{}^{37}Cl_2$	21.1	456.4±0.2
$C^{35}Cl_3{}^{37}Cl$	42.2	459.4±0.2
$C^{35}Cl_4$	31.6	462.4±0.2

目前对色散型激光拉曼光谱仪已提出了全系统校正的完整方案[18]，包括谱仪的波数精度及重现性，狭缝函数，光谱分辨率，功率传递系数，光谱响应，偏振光谱响应，偏振传递性能及寄生谱带检索等，以确保在可靠的基础上进行拉曼光谱学的研究。

四、一些激光拉曼光谱仪的性能

近年来激光拉曼光谱仪发展很快，商品化的仪器型号很多，许多厂家已设计并生产出专用的FT-Raman光谱仪。

初期的FT-Raman光谱仪是在FTIR光谱仪上加上FT-Raman附件，如Perkin Elmer公司的2000R型近红外FT-Raman光谱仪，Bruker FRA-106FT-Raman光谱仪，Nicolet公司的与FTIR800型联用的FT-Raman光谱仪等。目前不少厂家已生产专用的FT-Raman光谱仪，如Nicolet 900系列FT-Raman光谱仪，Bruker公司的RFS-100型FT-Raman光谱仪，Bio-Rad公司的FT-Raman Ⅱ光谱仪。下面列举Bio-Rad公司FT-Raman Ⅱ光谱仪的主要性能指标：分辨率：0.5cm^{-1}，(0.25cm^{-1}可选件)；光谱范围：(3600～120) cm^{-1} (stokes)；可选：(3600～70) cm^{-1} (Stokes)，(2000～150)cm^{-1}(Anti-stokes)；激光源：Spectra-physics Nd-YAG(2W)；检测器：液氮冷却锗检测器；数据系统：HP486/50MHzPC，WIN-IR光谱软件，Raman定量软件，输出设备HP4L Laser Printer。该仪器有多种拉曼采集方式和6种以上的采样装置。

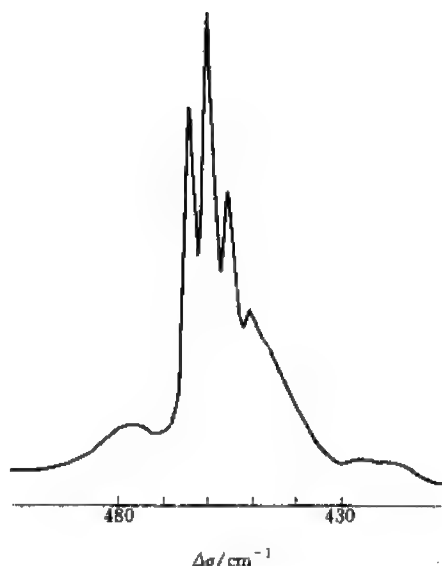


图 21-18　四氯化碳对称振动的多重结构（30%环已烷）
样品池：毛细管；狭缝宽：0.8cm^{-1}；
扫描速度：1.5cm^{-1}·min^{-1}；
激光光源：OIPHe-Ne；功率：150mW

第三节　拉曼光谱的取样技术

一、散射光收集方式

散射光的收集方式有透镜收集和镜面反射收集两种，散射光与激光束之间有三种关系：0°(前散射)，90°及180°(背散射)，见图21-19[6]。

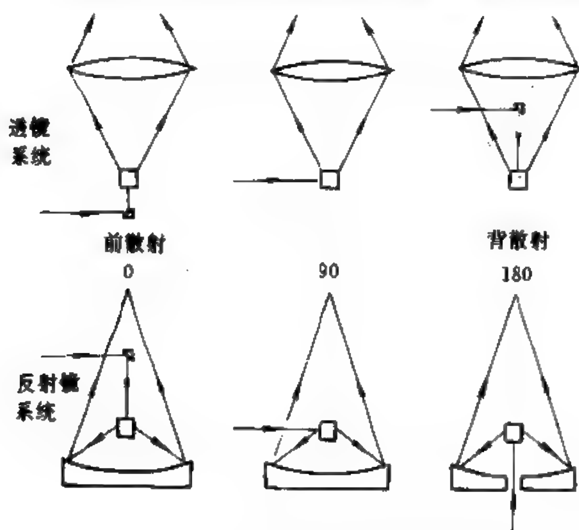


图 21-19　FT-Raman光谱仪各种取样方式

在实际应用中以90°和180°两种较多。180°的镜面反射收集方式收集效率最高，但需要仔细调整样品位置，稍微偏离最佳位置，拉曼信号明显下降。大样品散射光收集一般采用透镜方式。

二、拉曼光谱的一般取样技术

1. 气体样品

由于气体样品的拉曼散射光更弱，为了提高它的拉曼信号强度，样品池中气体要有较大压力或采用多次反射的气

体池，两种不同方式的气体试样池见图 21-20[5]。

2. 液体

常量液体样品可用核磁共振样品管或常规样品池，在微量测定中，可用毛细管液体池，根据样品量的多少，可选用不同直径的毛细管，将样品装入毛细管后，放入样品室中，通过调节，使光束正好对准样品。对于低沸点样品，毛细管应封闭。为增加收集效率可用底部为球形的玻璃管，即球形池，球形池的一侧镀银，以增加反射效率，适用于拉曼散射较弱及稀溶液样品。Schrader 设计出由宝石材料制成的球形液池，采用透镜收焦方式，见图 21-21[6]。液体样品池的放置有以下几种方式，见图 21-22[6]。

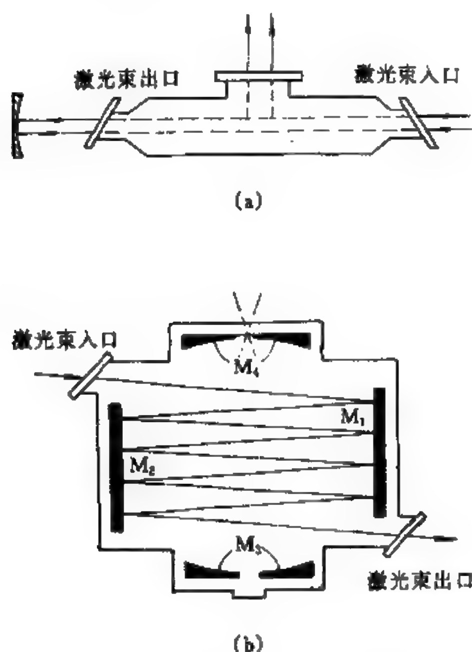


图 21-20 两种不同方式的气体试样池
(a) 垂直式气体池；(b) 多次反射式气体池
M_1、M_2—反射电镜；
M_3、M_4—聚集散射的聚光镜

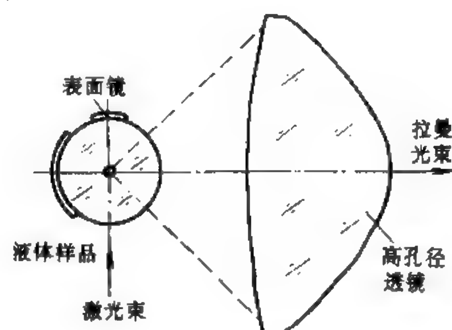


图 21-21 液体球形池

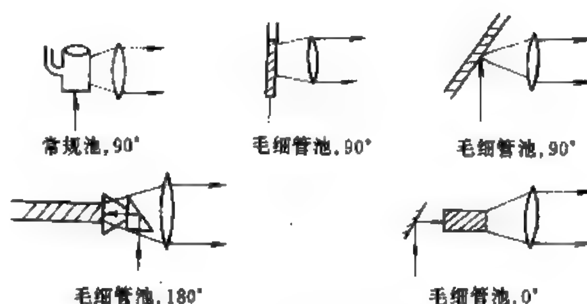


图 21-22 液体样品池的放置方式

3. 固体

对透明的棒状、块状和片状固体样品可直接进行测定，可固定在表面镀金或镀银的样品架载片上（图 21-23[6]），亦可将固体样品放在水平样品架上或放在 XYZ 三维可调的载物台上（图 21-24[6]），但均需垫一滤纸。

对粉末状样品常用的样品容器是 5mm 的核磁共振管或毛细管，将装有样品的管插入如图 21-25[6]所示的样品架中。

粉末样品还可使用样品杯，样品杯放在水平粉末样品架上（图 21-26[6]），为了增加样品密度以提高散射截面，可将粉末压片。

Schrader 设计出晶体粉球形池（图 21-27[6]）图中 Cp 为晶体粉末，装入不锈钢圆筒，HS_1 和 HS_2 为玻璃或宝石半球，SM 为反射镜，激光束 LB 由小孔进入，RB 为收集的散射光。

4. 样品旋转技术

因使用的激光光源的激发线常常在样品的吸收带内，故能引起样品局部过热，造成分解或破坏，特别是对某些聚合物，生物高分子化合物和深色化合物更是如此。用脉冲激光器作光源可防止或减少这种分解。采用旋转技术亦是防止样品分解的有效方法。

固体样品的旋转装置见图 21-28[13]，转速为（1000～4000）r・min^{-1}，激光光束聚焦于样品表面。Kiefer 等人设计了一种用于旋转技术的液体样品池，见图 21-29[13]，它是由石英玻璃制成的圆筒形池，外径为 60mm，高 25mm，此池对称地固定于黄铜片上，它有一中心棒，棒由马达带动旋转，转速为（0～3000）r・min^{-1}。当池旋转时，离心力使液体紧贴池壁，激光束用焦距为 50mm 的透镜聚焦，并从下射到池壁的样品上，为减少对拉曼光的自吸收，激光束要尽可能地靠近池壁。

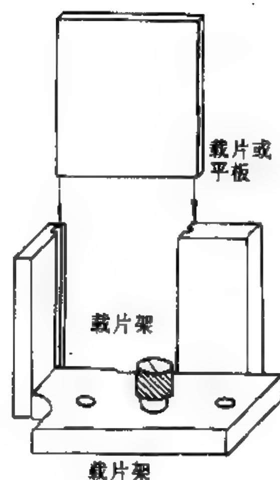


图 21-23 载片样品架

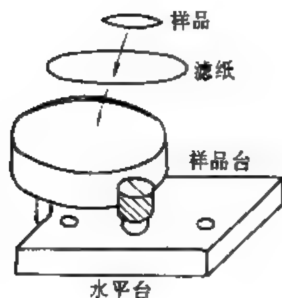


图 21-24 载物台

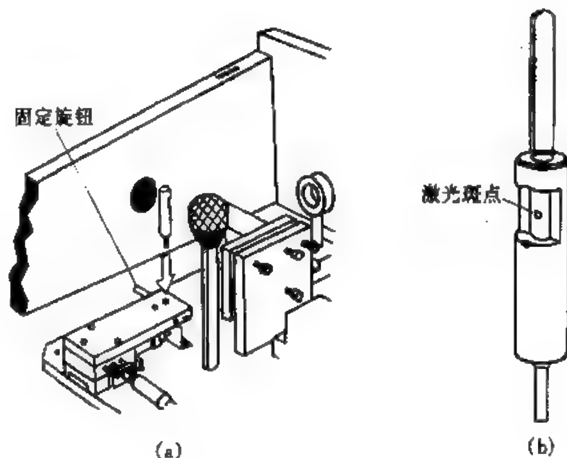


图 21-25 粉末状样品常用容器及安装方法

(a) 180°镜面反射收集方式中核磁共振管架安装方法；
(b) 核磁共振管及核磁共振管架

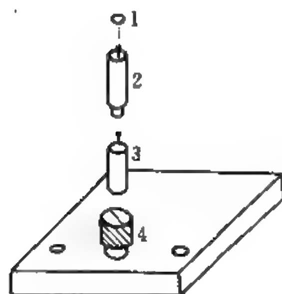


图 21-26 粉末样品杯及其放置

1—样品；2—可移动样品杯；
3—可移动样品杯架；4—粉末样品杯架

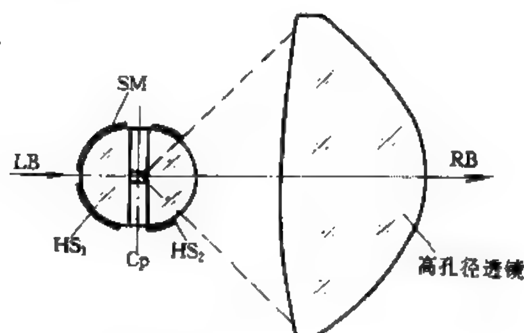


图 21-27 晶体粉末样品池

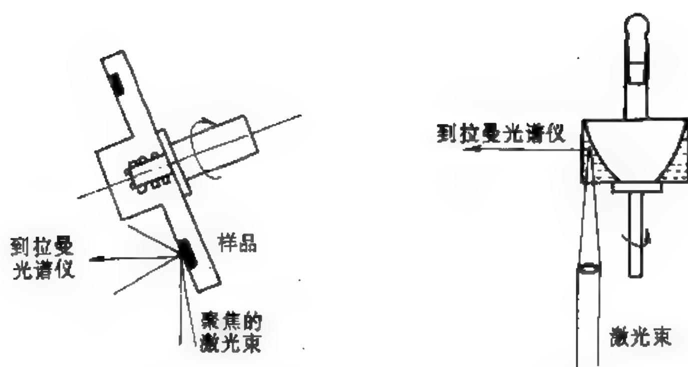


图 21-28 样品旋转技术装置 图 21-29 用于旋转技术的液体样品池

样品旋转技术还能提高分析灵敏度，在不旋转情况下，因样品分解产物沉积在池底，会降低激光功率，另外由于在样品内产生温度梯度，使折射指数也有一梯度变化，从而妨碍激光聚焦，这就是所谓激光热透镜效应，也会降低激光功率。样品旋转技术可消除或降低上述影响，增加测定的灵敏度。

三、拉曼光谱的特殊取样技术

1. 激光拉曼光谱的光纤采样技术

光纤采样技术可用于化学反应过程的现场检测和生物活体的分析研究，在激光拉曼光谱中已有不少应用。近红外光在光导纤维中有良好的传导性，传导距离已超过1000m，因而FT-Raman 光导纤维取样技术更有良好的应用前景。FT-Raman 光导纤维取样技术示意图如图21-30[6]所示。

光源为 Nd：YAG 激光器，由微调定位器调节使激光光束进入输入光纤，输入光纤和收集散射光的光纤是捆在一起的，其端面图 21-30 下部，从光纤来的激发光束发散地照射在样品上，收集散射光的光纤出光端与干涉仪联接。

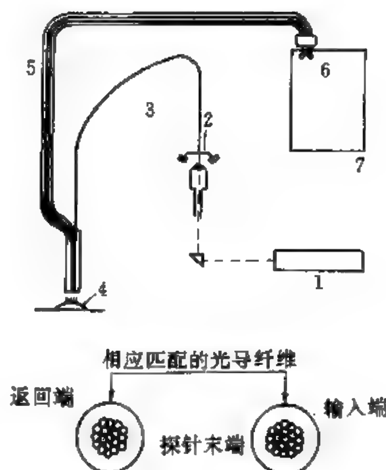


图 21-30 FT-Raman 光谱仪光导纤维取样示意图

1—Nd：YAG 激光器；2—微调定位器；3—输入激光光导纤维；4—显微物镜；5—收集光导纤维；6—光阑；7—干涉仪

在光纤采样技术中，光纤探头设计至关重要，光纤的特性指标之一是数字孔径：

$$N_A=\sin Q_m=\sqrt{n_1^2-n_2^2} \qquad (21\text{-}14)$$

式中，n_1、n_2 分别为光纤及外包层的折射率；Q_m 为光纤接受锥角，只有在 Q_m 之内的光才能被接收。光纤探针收集效率主要由激发光纤半径 R_1，收集光纤半径 R_2 和 Q_m 决定，高效率的探针需选取较细的入射光纤。由钟发平等设计的一种光纤束拉曼探头是以入射光纤为圆心，5μm 的通信光纤（约 2000 根）排列为同心圆，在探针端面 0.4m 处将入射光纤与光纤束分离，用金属细网和塑料外套保护，三个端面仔细抛光。光纤探针设计参数为：入射光纤为直径 30μm 的石英光纤，每米透过率(对 Ar^+ 的 514.5nm)为 97%，数字孔径N_A=0.4，接受光纤束直径为 2mm，数字孔径 N_A=0.56，透过率（500～800）nm 为 42%。

2. 退偏度的测量技术

退偏度的测量装置如图 21-31 所示[10]。

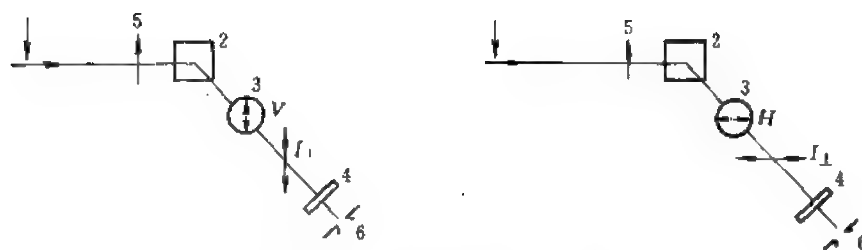


图 21-31　退偏的测量装置示意图

1—激光束；2—样品；3—偏振器；4—$\frac{1}{4}\lambda$板；5—激光束电矢量方向；6—单色器人射狭缝

$I_{//}$—与激光电矢量相平行的谱线强度；$I_{\perp}$—与激光电矢量相垂直的谱线强度

放置在单色器入射狭缝前的$\frac{1}{4}\lambda$板的作用是将线偏振转变成圆偏振，任何实验装置性能可以通过测量纯四氯化碳谱带的退偏度来检验。

偏振 FT-Raman 光谱的测定通常在 FT-Raman 光谱仪上加上偏振调制器。Polavarapu 在 1988 年提出用 Martin-Pulett 干涉仪（MPI）代替迈克尔逊干涉仪，MPI 既是干涉仪，又是偏振调制器，其优点是可同时测定两个 Stoke 参数 $S_1(\bar{\nu}_i)$ 和 $S_3(\bar{\nu}_i)$。$S_1(\bar{\nu}_i)$ 是平行偏振和垂直偏振散射强度的差别，$S_3(\bar{\nu}_i)$是左右圆偏振散射强度的差别，圆偏振的测定可用于立体化学研究。

在本章退偏度一节中已经指出全对称振动模式 $0\leqslant\rho_P<0.75$，非全对称振动模式 $\rho_P=0.75$，当某谱带 $\rho_P=0.75$，称此谱带为退偏振的，若 $0\leqslant\rho_P<0.75$，称此为偏振的，退偏度的测定可区别全对称振动和其他振动。

第四节　拉曼光谱技术

一、共振拉曼光谱法

1. 拉曼谱带共振增强原理及其特点

当激发频率接近或重合于分子的一个电子吸收带时，由于拉曼有效散射截面异常增大，使某一个或几个特定的拉曼谱带强度急剧增加，一般比正常拉曼谱带强度增大 $10^4\sim10^6$ 倍，并出现正常拉曼效应中所观察不到的，强度可与基频相比拟的泛频及组合振动。这种现象称为共振拉曼效应。基于共振拉曼效应的方法叫做共振拉曼光谱法（Resonance Raman Spectroscopy，RRS）[19]。

从理论上预测共振增强现象是基于 Kramers-Heisenberg-Dirac 色散方程。拉曼散射张量为

$$(\alpha_{ij})_{mn}=\frac{1}{h}\sum_{e}\left[\frac{(M_j)_{me}(M_i)_{en}}{\nu_e-\nu_0+i\Gamma_e}+\frac{(M_i)_{me}(M_j)_{en}}{\nu_e+\nu_s+i\Gamma_e}\right] \tag{21-15}$$

式中，m 和 n 分别为分子初始态和终态；e 为激态；$(M_j)_{me}$和 $(M_i)_{en}$为沿 j 及 i 方向的电偶极跃迁矩；ν_0 为入射频率；ν_s 为散射光子频率。此式为对所有激发态求和，当 ν_0 接近 ν_e 时。右式求和后的值非常大，为防止成为无穷大而添加衰减项 $i\Gamma_e$（电子跃迁带宽）。由此可知，共振增强的大小正比于共振电子跃迁矩，反比于其宽度。可以预期，强度大而形状尖的电子吸收带有最大的共振效应。通常可用 Herzberg-Teller 公式解析电子波函数对核位移的依赖关系；以说明那些振动会得到加强。

共振拉曼光谱法有以下特点：①灵敏度高，由增强的拉曼信号能检测低浓度及微量样品；

②不同的拉曼谱带的激发轮廓可给出有关分子振动和电子运动相互作用的新信息；③在共振拉曼偏振测量中，有时可以得到在正常拉曼效应中不能得到的关于分子对称性的情况；④利用标记官能团的共振拉曼效应，可研究大分子聚集体的部分结构。

共振拉曼光谱法已成为研究有机和无机分子、离子，生物大分子甚至活体组成的有力工具，已发表了许多有关这方面的综述性文章。

2. 共振拉曼光谱法的实验要求

(1) 共振拉曼光谱法要求激发光源频率可调，以使激发频率 ν_0 接近或重合于各种分子最低允许的电子跃迁频率 ν_e。因此，可调谐染料激光器常是获得共振拉曼光谱的必要条件。

(2) 由于吸收过程对拉曼散射的影响，因此，在实验时要尽可能地将激光聚焦到靠近出口的样品表面上，甚至仅掠过样品表面以减小吸收。从拉曼差分光谱及溶液的可见紫外光谱中可求得每条拉曼谱带的吸收校正因子。

(3) 由于对强激光的吸收而引起的热透镜效应和样品分解，可通过脉冲激发光源，样品旋转技术及激光扫描表面来避免。旋转样品及表面扫描装置见图 21-32。

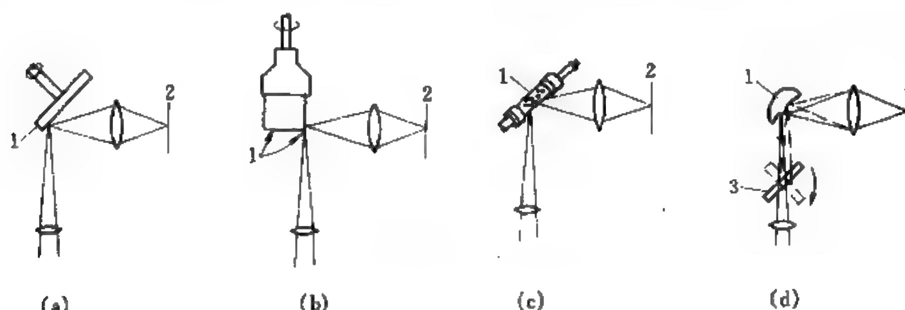


图 21-32 旋转样品及表面扫描装置 [2]

(a) 粉末；(b) 液体；(c) 气体；(d) 表面扫描技术

1—样品；2—狭缝；3—旋转折射板

(4) 荧光背景的干扰可采用时间分辨技术来消除，以多道分析器或二极管阵列作检测手段，毫微秒到微微秒的脉冲激光作光源的拉曼分光计来记录时间分辨共振拉曼光谱。

二、表面增强拉曼光谱法

1974 年 Fleischmann 等人首次发现在粗糙化的 Ag 电极表面吡啶分子具有极大的拉曼散射现象，其表面增强因子可达 10^6。这种表面增强效应称作表面增强拉曼散射，简称 SERS，现已发展为一种新的光谱分析技术——表面增强拉曼光谱法 (Surface-Enhanced Raman Spectroscopy，SERS)[20]。我国在 80 年代初也开始了 SERS 的研究。

(一) SERS 的特性

在对 SERS 效应作了大量研究后已获得了一些规律：

(1) 许多分子都能产生 SERS 效应，但只有在少数几种基体上，如 Ag、Cu、Au、Li、Na、K 等的表面产生增强效果，其中银基体的 SERS 效应最为明显，可使拉曼散射截面增大 5～6 个数量。SERS 研究大多是在银基上进行的，其中银溶胶和银电极使用最多，也有在化学沉积银膜，真空镀银膜和硝酸蚀刻银膜上进行。在一些半导体基体上，如 n-CdS 电极，α-Fe_2O_3 溶胶和 TiO_2 电极上也可观察到 SERS 现象。用金或铜作基体的 SERS 研究则较少，它只有在红光下才能显示出 SERS 效应。

(2) SERS 效应与基体的粗糙度有密切关系，金属表面的粗糙化是产生 SERS 的必要条件。关于表面粗糙度的范围可分为两类，第一类是由于多晶结构或珊瑚礁结构产生的具有几十纳米至 100nm 范围的亚微观粗糙度，第二类为原子级范围的粗糙度。被吸收原子或原子群由于台阶、弯曲所产生的表面不均匀性，不同范围的表面粗糙化相应于不同的 SERS 增强机理。

(3) SERS效应表现有长程性和短程性，前者分子离开平面几纳米 (nm) 至 10nm 仍有增强效应，而后者离开表面 (0.1～0.2)nm 增强效应即减弱。

(4) 研究了一些化合物的 SERS 的激发谱，发现 SERS 的强度并不与激发光频率 4 次方成正比。大多数分子的 SERS 强度在黄到红激发光区有一个极大值，而且不同分子或同一分子的不同 SERS 谱峰极大时的激发光波长各不相同。

(5) SERS谱峰的退偏度与正常拉曼谱峰不同，不同类型的正常拉曼峰的退偏度有很大差别，但所有的 SERS 谱峰的退偏度很相近。

(6) 分子的振动类型不同，则增强因子也不相同，增强极大和激发频率关系曲线也不相同。

(7) 在 SERS 中，有时仅为红外活性的振动类型也会出现在 SERS 光谱中。

(8) 当在分子的吸收带频率内进行激发时，可获得更大的 SERS 信号，其增强因子可达 10^4～10^8。

(二) SERS 的增强原理

人们认为金属表面粗糙化是产生 SERS 的必要条件，目前主要有两种理论模型来解释 SERS 的增强机理：一种是电磁共振理论，认为超原子级粗糙化［(5～100)nm］的金属表面与人射光相互作用产生了等离子诱发电磁共振，增加了金属表面的局部电磁场，同时分子的拉曼散射光对等离子的激发也增强了局部电磁场。另一种是化学理论，认为拉曼散射增强是由于分子极化率即拉曼散射截面的改变引起的，原子级粗糙化金属表面存在的活性位置引起化合物分子与金属表面原子间的化学吸附而形成复合物，导致分子极化率改变。迄今提出的多种理论模型都能在某一特定情况下解释 SERS，但均存在一定的局限性，SERS 是个复杂过程，可能既包括物理增强又有化学增强，还需进一步研究。

我国有关 SERS 机理的理论研究有[21]：郭伟立等提出了一个同时涉及物理增强和化学增强的 SERS 模型，由此导出一个 SERS 增强因子表达式，估算了起源于分子和金属之间电荷转移的增强因子为 10^2～10^3，而起源于局域场的增强因子为 10^3～10^4，用这一模型能较好地解释许多 SERS 特性。从分子间相互作用对分子极化率的影响出发，推导出分子之间电荷转移导出极化率的公式，此式表明 SERS 效应是由电磁诱导，电荷转移以及电荷转移随分子振动的变化引起的。吴国祯等推导出 SERS 强度和分子键导出极化率的关系，测得并分析了一些化合物的键导出极化率随电极电位变化的数据，指出化学增强和物理增强两因素在 SERS 中同时起作用。

我国学者研究过的具有 SERS 效应的化合物约在 80 种以上[21]，其中吡啶的 SERS 光谱研究得最多，其次对染料分子的 SERS 研究也比较多。

表面增强拉曼光谱技术在生物研究中得到普遍的重视和应用，最早由 Koglin 和 Seqaris 应用 SERS 技术研究核酸碱基和 DNA，Nebiev 研究氨基酸，膜蛋白和核酸，Cotton 研究有色蛋白，至今已有许多综述总结了在生物体系中的应用[22]。

三、非线性拉曼光谱[12]

拉曼效应是光的电磁场与物质分子相互作用产生极化而造成的，分子所感生的偶极矩 μ 与入射光的电场强度 E 有如下关系：

$$\mu=\alpha E+\frac{1}{2}\beta E^2+\frac{1}{6}\gamma E^3+\cdots \tag{21-16}$$

在一般拉曼光谱中，入射光的电场强度较小，分子振动的振幅很小，上式中的高次项可以忽略，μ 与 E 之间呈线性关系，

$$\mu=\alpha E$$

α 为分子的极化率。但当入射光的电场强度超过 $10^9 V\cdot m^{-1}$ 时，高次项不能忽略，就能看到非线性拉曼效应。式中 β、γ 为一级和二级超极化率(从电子平衡构型计算中获得 $\alpha=10^{-24}cm^3\cdot esu^{-1}$，$\beta=10^{-30}cm^3\cdot esu^{-1}$ 及 $\gamma=10^{-36}cm^3\cdot esu^{-1}$)。由于非线性拉曼效应较一般的拉曼效应具有较高的灵敏度和能有效地区分荧光，因此它开拓了许多新的化学应用，其中包括在分析化学中的应用。目前已得到应用的非线性拉曼光谱技术有：受激拉曼光谱(Stimulated Raman Scattering，SRS)，超拉曼效应(hyper-Raman effect)，反拉曼散射(Inverse Raman Scattering，IRS)，受激拉曼增益(Stimulated Raman Gain，SRG)，相干反斯托克斯拉曼光谱(Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy，CARS)，相干斯托克斯拉曼光谱(Coherent Stokes Raman Spectroscopy，CSRS)和拉曼感生克尔效应光谱(Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy，RIKES)等。

图 21-33 给出非线性拉曼过程的能级图。图中 (a) 受激拉曼散射 (SRS)；(b) 超拉曼效

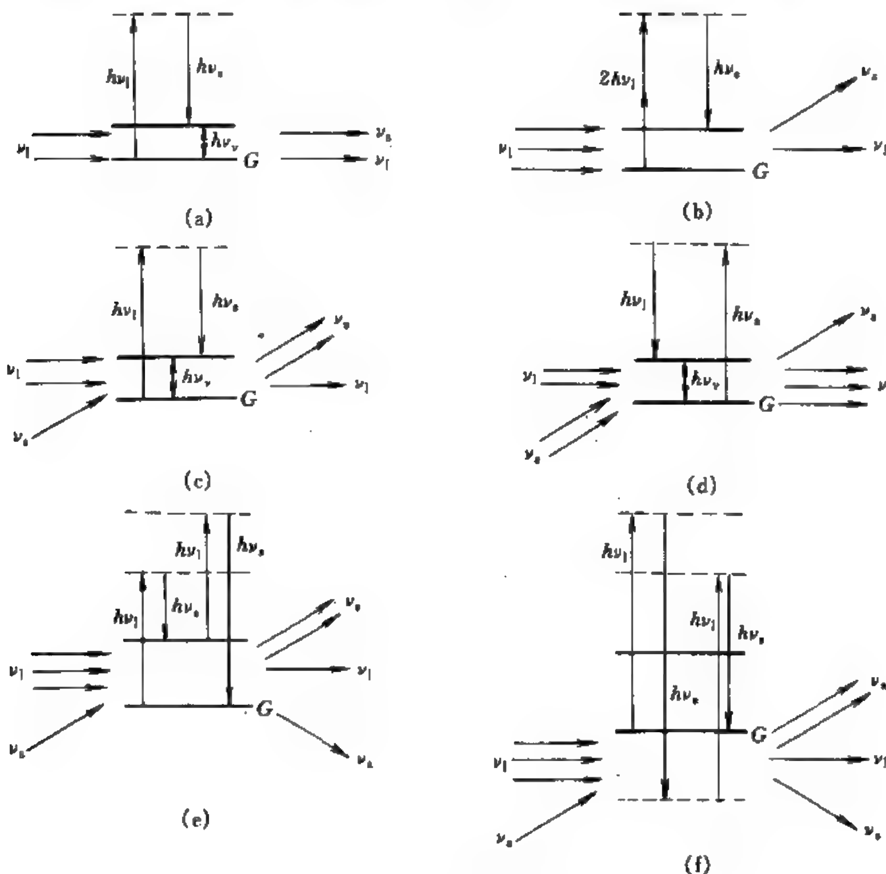


图 21-33　非线性拉曼过程能级图

应；(c) 受激拉曼增益 (SRG)；(d) 反拉曼散射 (IRS)；(e) CARS；(f) CSRS。图中基态振动能级用G表示，虚线表示虚态，实线表示真实的振动能级；每一图中左面的箭头表示入射光，右面箭头表示离开样品的光；ν_l——激光频率，ν_s——斯托克斯线频率，ν_a——反斯托克斯线频率，ν_v——振动频率。

（一）受激拉曼散射

受激拉曼散射产生的机制如图 21-33 (a) 所示。当入射光强度增加至某一程度时，频率为ν_S的散射光的强度也增加到某一强度，此时能诱发虚态至基态的跃迁而产生受激发射，并迅速自催化增加而成为受激拉曼散射。这一过程使自发拉曼散射放大了10^{13}倍，且散射光是相干的，其方向与入射光方向一致。要产生受激拉曼散射，入射光强度必须高于某一阈值。

在一般拉曼效应中，其效率只有10^{-8}，而在受激拉曼效应中，其效率可达百分之九十，产生拉曼光的方向又和入射光一致，故可用它作为改变激光频率的一种方法。例如用高能CO_2激光束照射含氢或氘的样品池，使之产生受激拉曼效应，从而使激光频率移至 16μm。

有关 SRS 的近代理论已有讨论，SRS 在分析上的应用还有限，正引起工业分析方面的关注。主要用于检验单个微液滴的成分，包括水，四氯化碳，苯和酒精，燃料液滴等。并且发展了一种理论来解释在微米大小液滴上观察到的主要光谱和空间特征。此外，还可应用 SRS 作为研究碰撞现象和燃烧过程的工具。

（二）超拉曼效应

超拉曼效应产生的机制如图 21-33 (b) 所示。当频率为ν_l的高强度激光束照射样品时，样品吸收两个光子而跃迁到虚态，然后发射频率为$\nu_s=2\omega_l\pm\nu_v$的拉曼光，这叫做超拉曼效应。

超拉曼效应是在 1965 年才发现的。超极化率与简正坐标的微分方程式如下：

$$\beta=\beta_0+\left(\frac{\partial\beta}{\partial Q}\right)_0 Q+\cdots$$

Q的高次项可以略去。$\left(\frac{\partial\beta}{\partial Q}\right)_0$不是零，在谐振子场合下

$$\beta=\beta_0+\left(\frac{\partial\beta}{\partial Q}\right)_0 Q_0\cos\omega t \qquad (21\text{-}17)$$

超拉曼效应的选择定则及偏振性质均不同于一般拉曼效应。一些振动是非红外和拉曼活性而是超拉曼活性的，故对解决某些特殊分子结构有一定的用途，已有人对超拉曼效应作了系统的阐述。

（三）受激拉曼增益和反拉曼散射

受激拉曼增益和反拉曼散射是密切相关的两种非线性技术，后者亦称为受激拉曼衰减 (Simulated Raman Loss Spectroscopy)，其产生机制分别如图 21-33(c)和图 21-33(d)所示。

在受激拉曼增益光谱技术中，用两个不同取向的激光束入射到样品上，其中一个为较强的泵浦激光，频率为ν_l，另一为弱的探针激光，当调节探针激光频率ν_s，使之$\nu_v=\nu_l-\nu_s$，ν_v为分子振动频率，通过受激拉曼散射过程，使样品在ν_s频率处提供一定程度的增益作用，从而使较弱的频率为ν_s的探针光束通过样品后而增强；相反，频率为ν_l的泵浦光通过样品而减弱。

反拉曼散是受激拉曼增益的逆过程，当探针光束扫描通过反斯托克斯频率ν_a，即$\nu_a=\nu_l+\nu_v$时，则频率为ν_l的强激光引起样品分子的受激拉曼散射跃迁，并同时导致频率为ν_a的探针光束的减弱。

SRG 和 IRS 都是相干过程，它们很容易与荧光相分离。反拉曼散射更不受荧光的干扰，也不受全对称方式的影响，可获得一张完全的光谱图，这在物质结构的研究上很有用。

（四）相干反斯托克斯拉曼光谱和相干斯托克斯拉曼光谱

相干反斯托克斯拉曼散射首先被 Terhune 和 Maker 发现，是目前应用最广的非线性拉曼光谱技术，如图 21-33 (e) 所示。CARS 技术使用两个激光光源，泵浦光束频率在 ν_1，斯托克斯位移探针光束频率在 ν_s，当两个光束以足够的能量聚焦于样品上时，产生频率为 $\nu_{as}=2\nu_1-\nu_s$ 相干的反斯托克斯射线，这就是样品的 CARS 谱线。CSRS 技术类似于 CARS 技术，此时探针光束频率在反斯托克斯位移频率 ν_a，当泵浦光束和探针光束聚焦于样品上时，产生频率为 $\nu_s=2\nu_1-\nu_a$ 相干的斯托克斯射线，见图 21-33(f)。

相干反斯托克斯拉曼光谱的优点有：发射强度高（拉曼效率大于 10^{-2}），因而灵敏度高；CRAS 线是一清晰的光束，故聚焦效率高；CARS 线与入射光束在空间上是分开的，用一可变光栏去 ν_1 和 ν_s 即可单独测量 CARS 线，因而不需要单色器；CARS 线在入射光的短波方向，而荧光一般在入射光的长波方向，用一干涉滤光片即可消除荧光干扰，一般可使荧光干扰减小 10^9 倍。CARS 的优点已作了评述。

CARS 的测量装置如图 21-34 所示。

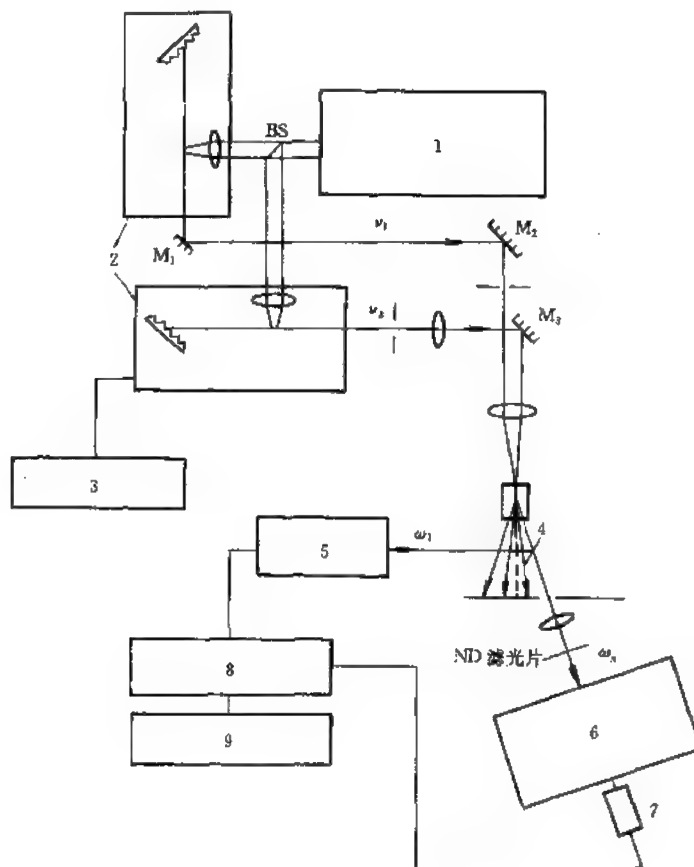


图 21-34　CARS 的实验装置

1—氮激光器；2—染料激光器；3—扫描控制器；4—样品池；5—参比检测器；6—单色器；7—信号检测器；8—光电倍增管；9—记录仪

第五节 特征拉曼频率

一、有机化合物的特征拉曼频率[23,9]

（一）有机化合物特征拉曼频率的规律

①非极性或弱极性基团具有强的拉曼谱带，而强极性基团具有强的红外谱带。

②根据选择偏振定则，具有对称中心的分子产生的谱带在拉曼和红外光谱中其波数是不同的。

③脂肪族基团的C—H伸缩振动在拉曼光谱中很强，其强度正比于分子中C—H键的数目，而其弯曲振动谱带很弱。

④烯烃和芳环的C—H伸缩振动在拉曼光谱中呈中等强度。

⑤炔烃的C—H伸缩谱带在拉曼光谱中是弱带。

⑥在不饱和系统(烯基和芳香化合物)中，面外C—H弯曲振动仅在红外光谱中具有强带。

⑦极性基团，如O—H和N—H的伸缩谱带在拉曼光谱是弱带，甚至很弱。另外，这些基团的弯曲谱带在红外光谱中亦比在拉曼光谱中强。

⑧C—C、N—N、S—N和C—S等单键的伸缩振动在拉曼光谱中是强带。

⑨ C═C 、C═N 、N═N 、C≡C 和 C≡N 等重键的伸缩振动在拉曼光谱中是极强带，而在红外光谱中是弱带或极弱带。但 C═O 伸缩振动在红外光谱中是极强带，而在拉曼光谱中是中强带。

⑩含环的化合物的拉曼光谱仅有一个强带，这是环的呼吸振动的特征，其频率取决于环的大小。

⑪芳香族化合物在拉曼和红外光谱均产生一系列尖锐的强谱带。

⑫H—C—H和C—O—C等基团具有两个伸缩振动，对称和不对称的。在拉曼光谱中对称的强于不对称的，而在红外光谱中则相反。

⑬倍频和合频谱带在红外光谱中比在拉曼光谱中强，在拉曼光谱中很少见到。

（二）有机化合物特征拉曼频率表

1. 烷烃和环烷烃的特征拉曼频率

本节各表中强度一栏中的符号s—强，m—中，w—弱，vs—极强，vw—极弱，var—可变，p—偏振性，sh—肩峰，b—宽。

表 21-12 烷烃和环烷烃的特征拉曼频率

基团		频率 σ/cm^{-1}	强度	基团		频率 σ/cm^{-1}	强度
烷烃				R—C—C—R（R分别连于两个C上）	扭曲	420～150	
CH_3	不对称伸缩	2960±10	s		骨架振动	1170～1160	m
	对称伸缩	2870±10	s			970～960	m
	不对称变形	1460	w			810	m
	对称变形	1375	vw				
	平面摇摆	1135		$(CH_3)_2CH$	变形振动	1380	—
CH_2	不对称伸缩	2925±10	s			1370	
	对称伸缩	2850±10	s		骨架振动	1170	m
	变形振动	1465	m			1155	m
	非平面摇摆	1300	w	$(CH_3)_3C$	变形振动	1395	—
CH	伸缩振动	2890±10	w			1370	—
	变形振动	1340	w		骨架振动	1250	
$(CH_3)_n$	非平面摇摆	1300	s			1205	
	C—C伸缩（2个键）	1100～1000（一般在1075）				750～650	s
	C—C伸缩（3或4个键）	900～800				930	m

续表

基　团	频率 σ/cm^{-1}	强度	基　团	频率 σ/cm^{-1}	强度
环丙烷及其衍生物			非平面摇摆	1245～1220（1260）	m～w
CH_2 不对称伸缩	3105～3085（3102，3082）	m～w	卷曲振动	1250～1050（1224）	w
对称伸缩	3040～3020（3038）	m	平面摇摆	≈800（626）	w
	3020～3000（3024）	s	α-H 伸缩振动	≈2970	w
剪式振动	1420～1400（1438）	w	弯曲振动	1360～1250	w
卷曲振动	1170～1070	w	环 呼吸振动	960～950(1005vs926,s901w)	m
非平面摇摆	1070～1050（1028）	w	变形振动	1080～1050	w
平面摇摆	1030～990	w		900～880	w
	805～750	w		780～700	m
α-CH 伸缩振动	3060～3020	m～s	折叠振动	180～140（199）	w
弯曲振动	1365～1295	w	环戊烷		
环 呼吸振动	1200～1180（1188）	var	CH_2 不对称伸缩	2959～2952	s
变形振动	960～900（868）	var	对称伸缩	2866～2853	s
	880～800	var	剪式振动	1455	m
环丁烷及其单取代衍生物			环 呼吸振动	886	vs
CH_2 不对称伸缩	3000～2985（2974）	—	环己烷（椅式异构体）		
	2990～2970	var	CH_2 不对称伸缩	2933～2915	vs
	2956～2945（2965）	s	对称伸缩	2879～2852	vs
对称伸缩	2985～2975	s	剪式振动	1452	m
	2970～2955（2945）	m	环 呼吸振动	802	vs
剪式振动	1450～1440（1443）	m			

2. 烯烃的特征拉曼频率

表 21-13　烯烃及其取代产物的特征拉曼频率

基　团		频率 σ/cm^{-1}	强度	基　团		频率 σ/cm^{-1}	强度
$RHC=CH_2$	CH_2 不对称伸缩	3090～3075	m	$RHC=CHR$（H、H 同侧）	CH 伸缩	3020～2995	m
	CH 伸缩	3020～2995	s、p		C═C 伸缩	1662～1631	vs、p
	CH_2 对称伸缩	3000～2980	w		顺式 CH 对称平面摇摆	1270～1250	s
	CH_2 倍频	无			顺式 CH 面外摇摆	730～650	vw
	C═C 伸缩	1650～1638	vs、p	$RHC=CHR$（H、R 同侧）	CH 伸缩	3010～2995	m
	CH_2 剪式变形	1420～1412	s、p		C═C 伸缩	1676～1665	vs、p
	CH 平面摇摆	1309～1288	s、p		反式 CH 对称平面摇摆	1325～1300	s
	CH 面外摇摆	995～985	w		反式 CH 面外摇摆	980～965	vw
	CH_2 面外摇摆	910～905	w	$R_2C=CHR$	CH 伸缩	3040～3020	m
	顺式 CH 面外摇摆	688～611	w		C═C 伸缩	1680～1664	vs、p
$R_2C=CH_2$	CH_2 不对称伸缩	3090～3075	w		CH 面内摇摆	1360～1322	w
	CH_2 对称伸缩	3000～3075	s、p		CH 面外摇摆	840～790	vw
	C═C 伸缩	1660～1640	vs、p	$R_2C=CR_2$	C═C 伸缩	1680～1665	vs、p
	CH_2 剪式变形	1420～1400	m、p				
	CH_2 面外摇摆	900～885	w				

3. 炔烃的特征拉曼频率

表 21-14　炔烃的特征拉曼频率

基　团①	频率 σ/cm^{-1}	强度	基　团①	频率 σ/cm^{-1}	强度
≡C—H 伸缩	3340～3290（溶液）	w,p	M—C≡C—CH_3	2200～2170	vs,p
R—C≡C—H	3320		—C≡C—C≡C— 不对称伸缩		
GCH_2—C≡C—H	3320～3310		H—C≡C—C≡C—X	2245～2175	
M—C≡C—H	3303～3281		—C≡C—C≡C— 对称伸缩		
≡C—H 弯曲	681～610（溶液）	w	H—C≡C—C≡C—X	2100～2000	
R—C≡C—H	640～625	m～w、dp	R—C≡C—C≡C—R′	2257～2251	vs,p
M—C≡C—H	707～675，663～577		≡C—C 伸缩，单取代	1000～940	m～w
C≡C 伸缩，单取代	2130～2100	vs,p	双取代	1160～1005	m～w
R—C≡C—H	2130～2120	vs,p	C—C≡C—C 不对称伸缩	≈1160	
M—C≡C—H	2055～2019	vs,p	对称伸缩	842～758	
双取代	2250～2200	vs,p	≡C—C 弯曲		
	2325～2290（弗米共振）	var	CH_3—$(CH_2)_n$—C≡CH，$n=0\sim5$	348～336	m～w
R—C≡C—R′	2237～2230	vs,p	CH_2XC≡CH	314～311，186～311	
			CHO—C≡C—H	261，226	
			COOH—C≡C—H	245，218	

① 基团中的符号：

G——H，R，SCH_2ph，Sph，Oph，NR_2，F，Cl，Br，I；M——P，As，Sb，Si，Ge，Sn；X——F，Cl，Br，I。

4. 苯及其衍生物的特征拉曼频率

苯分子具有 D_{6h}对称性，其基频振动的分配及活性如下：Γ(平面振动)$=2A_{1g}(R)+2B_{1u}(ia)+2Bu(ia)+4E_{2g}(R)+3E_{1u}(IR)+A_{2g}(ia)+A_{2u}(IR)$，$\Gamma$(非平面振动)$=2B_{2g}(ia)+E_{1g}(IR)+2E_{2u}(ia)$(R——拉曼活性，IR——红外活性，ia——非活性）液体苯的拉曼光谱的振动指定列于表 21-15。

表 21-15 苯的特征拉曼频率

振动类型	振动的近似描述	频率 σ/cm^{-1}	强度	振动类型	振动的近似描述	频率 σ/cm^{-1}	强度
A_{1g}	CH 伸缩	3062	vs	E_{2g}	CH 伸缩	3047	s
	环"呼吸"	992	s		环伸缩	1606，1585①	s
A_{2g}	CH 变形	1326	vw		CH 变形	1178	s
E_{1g}	CH 变形	849	m		环变形	606	s

① 费米共振。

单取代苯类，如果是单原子取代基并位于环平面内，则这类单取代苯具有C_{y2v}对称性，其30个基频振动分配如下：$11A_1(IR,R)+10B_2(IR,R)+3A_2(R)+6B_1(IR,R)$，见图 21-35 所示。

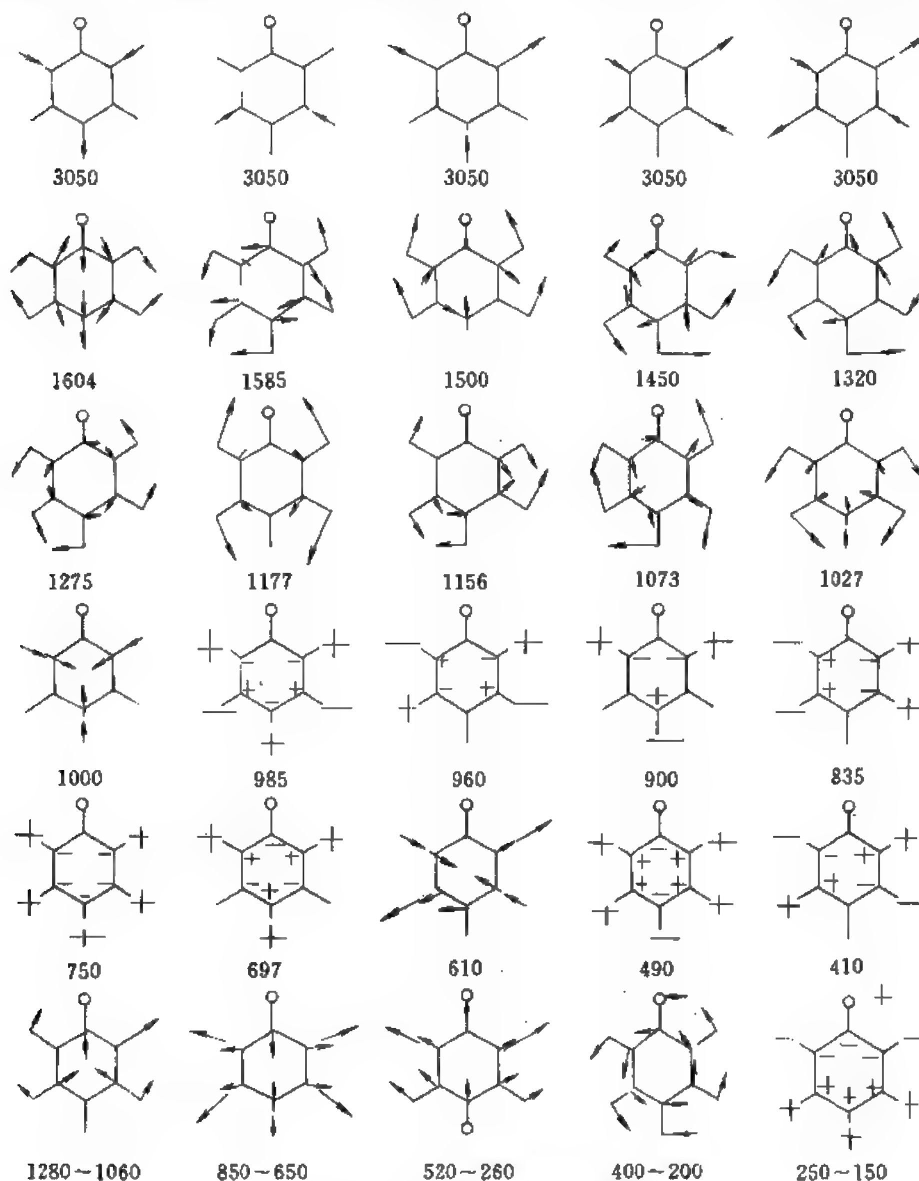


图 21-35 单取代苯的基频振动

取代不敏感的振动类型基频在上图所标值的±30cm⁻¹以内，余下 6 个为“x-敏感”的振动，其振动频率出现在一个较宽的范围内，如图中所示。

与红外光谱的情况相似，芳香烃的拉曼光谱具有 3050cm⁻¹及（1400～1650）cm⁻¹的锐利强峰，它们都是偏振的，此外在 1000cm⁻¹左右的偏振拉曼峰也是芳香烃的特征。苯环及其取代衍生物的特征拉曼频率如表 21-16，表 21-17 所示。

表 21-16　苯环及其取代衍生物的特征拉曼频率

振动类型	频率 σ/cm^{-1}	强度	振动类型	频率 σ/cm^{-1}	强度
C—H 伸缩振动	3080～3010	m	C═C 伸缩：1	1620～1600	s
C—H 变形振动	1270～980	var	2	1590～1570	s
C—H 面外弯曲振动	900～700	vw	3	1510～1480	w
C═C 对称伸缩	1005～990	vs	4	1450～1430	m

表 21-17　苯环取代类型的特征拉曼频率

取代类型	振动类型	频率 σ/cm^{-1}	取代类型	振动类型	频率 σ/cm^{-1}
无取代	C═C 对称伸缩	995R			540～520R
	C—H 伸缩	670IR	1,4-双取代	C═C 伸缩	830～720R
单取代	C—H 变形	1030R		C—H 面外弯曲	860～800IR
	C═C 对称伸缩	1000R		骨架振动	1230～1200R
	C—H 面外弯曲	770～730IR			1180～1150R
	C—C 变形	710～690IR			650～630R
1,2-双取代	C—H 变形	1040R	1,2,3-三取代	C—H 变形	1100～1050R
	C—H 面外弯曲	770～730IR		C—H 面外弯曲	810～750IR
	骨架振动	1230～1210R		C—C 变形	740～705IR
		740～715R		C—C 变形	670～500R
		680～650R	1,2,4-三取代	C—H 面外弯曲	890～870IR
		660～560R		C—H 面外弯曲	820～805IR
		560～540R		C—C 变形	750～650R
1,3-双取代	C═C 对称伸缩	1000R		骨架振动	1280～1200R
	C—H 面外弯曲	810～750IR	1,3,5-三取代	C═C 对称伸缩	1000R
	C—C 变形	720～680IR		C—H 面外弯曲	880～820IR
	骨架振动	1260～1210R		C—C 变形	730～675IR
		1180～1160R		C—C 变形	570～510R
		740～700R			

表 21-18　稠环芳烃骨架振动的特征拉曼频率

化合物	频率 σ/cm^{-1}	强度	化合物	频率 σ/cm^{-1}	强度
萘	1630～1595	w		1400～1390	vs
	1580～1570	vs	菲	1620～1600	m
	1510～1500	vw		1520～1500	m
	1390～1350	vs		1460～1440	s
蒽	1630～1620	ms		1350～1300	vs
	1560～1550	vs			

5. 醇和酚的特征拉曼频率

表 21-19　醇和酚的特征拉曼频率

基　团	频率 σ/cm^{-1}	强度	基　团	频率 σ/cm^{-1}	强度
游离 OH 伸缩振动(CCl_4 溶液)			面内 C—C—O 伸缩振动		
伯醇	3644～3635	w	伯醇	900～800	vs～m
仲醇	3637～3626	w	仲醇	900～800	vs～m
叔醇	3625～3614	w	叔醇	800～750	vs，p
叔双环醇	3612～3606	w	C—O—H 弯曲振动	≈1000	w～m
酚	3612～3593	w	伯醇	1430～1200	m～w
氢键 OH 伸缩振动			仲醇	1430～1200	m～w
分子间：			叔醇	1410～1310	m～w
多聚体	3400～3200	w	C—C—O 弯曲振动		
面外 C—C—O 伸缩振动			伯醇	460～430	m～w
伯醇	1075～1000	m～s	仲醇	≈500	m～w
仲醇	1150～1075	m～s	叔醇	≈360	m～w
叔醇	1210～1100	m～s			

6. 醚和过氧化物的特征拉曼频率

表 21-20 醚和过氧化物的特征拉曼频率

基团	频率 σ/cm^{-1}	强度	基团	频率 σ/cm^{-1}	强度
脂肪醚			面外伸缩 COC	1225～1200	w
不对称伸缩 COC	1150～1060	w	面内伸缩 COC	850～840	s
对称伸缩 COC	890～820	vs、p	芳醚		
变形振动 COC	500～400	vs、p	芳基—O 伸缩	1310～1210	w
醛缩醇			O—CH_2	1050～1010	w
不对称伸缩 COCOC，	1050～1040	var	环氧化合物		
$ROCH_2OR$，$(RO)_2CHCH_3$	1140～1130	var	CH_2 不对称伸缩	3075～3030	s
对称伸缩 COCOC	870～850	m	CH_2 对称伸缩	3020～2990	s
	1115～1080	m、p	环对称伸缩	1280～1230	s
变形振动 COCOC	660～600	m	环不对称变形	950～815	mw
	540～450	m～s	环对称变形	880～750	m
	400～320	m～s，p	过氧化物		
乙烯醚			O—O 伸缩	900～700	s

表 21-21 部分过氧化物的特征拉曼频率

化合物	频率 σ/cm^{-1}	化合物	频率 σ/cm^{-1}
H—OO—H	880	MeC(═O)—OO—C(═O)(p—C_6H_4—Me)	895，857
CF_3—OO—H	860	MeC(═O)—OO—C(═O)(p—C_6H_4—OMe)	896，858
CF_3—OO—D	863	MeC(═O)—OO—C(═O)(p—C_6H_4—Cl)	894，856
CF_3—OO—F	875	MeC(═O)—OO—C(═O)(p—C_6H_4—Br)	895，857
Me—OO—Cl	830	MeC(═O)—OO—C(═O)(p—C_6H_4—I)	894，840
Me—OO—Me	779	MeC(═O)—OO—C(═O)(m—C_6H_4—NO)	910，892，844
CD_3—OO—CD_3	713	MeC(═O)—OO—C(═O)(m—C_6H_4—F)	910，895，848
Et—OO—Et	882	MeC(═O)—OO—C(═O)(m—C_6H_5—Cl)	899，873
Me_3C—OO—CMe_3	771(或 850)		
$Me(CF_3)_2C$—OO—$C(CF_3)_2Me$	774		
$(CF_3)_3C$—OO—$C(CF_3)_3$	781(或≈850)		
Me(OH)CH—OO—H	881		
$HOCH_2CH_2$—OO—CH_2CH_2OH	883		
$C_6H_5C(═O)$—OO—$C(═O)C_6H_5$	883		
MeC(═O)—OO—$C(═O)C_6H_5$	894，855		
$MeCH_2CH_2C(═O)$—OO—$C(═O)C_6H_5$	898，870		

7. 含羰基化合物的特征拉曼频率

表 21-22 含羰基化合物的特征拉曼频率

基团	频率 σ/cm^{-1}	强度	基团	频率 σ/cm^{-1}	强度
脂肪醛(CHO)			对称 C—C(═O)—C 伸缩	800～700	s～m
费米共振双峰	2720～2695	vs	—CH_2—C(═O)—基团的 CH_2 变形	1420～1410	s
(C—H 伸缩＋2×C—H 面内弯曲)	2830～2810	m(肩峰)	C—C═O 面内变形：甲基酮	600～580	s～m
C═O 伸缩	1740～1720	s	乙基酮	600～585	s～m
C—H 面内摇摆	1410～1380	v～m	其他脂肪酮	640～620	m
C—C═O 的 C—C 伸缩				530～520	m
没有 α-碳支链的	1120～1090	m～sv	C—C(═O)—C 面内变形	430～390	m～w
带 α-碳支链的：C_4 基团骨架伸缩	800～700	v	环酮：环丁酮	1782	
C_5 基团骨架伸缩	770～750	v	环戊酮	1744	
C—C═O 面内变形：无 α 碳支链	530～510	m～w	环己酮	1709	
α-碳单烷基取代	550～540	m～w	环庚酮	1699	
α-碳双烷基取代	600～580	m～w	环辛酮	1078	
脂肪酮类(RCOR)			羧酸(COOH)		
C═O 伸缩	1725～1700	vs～s	单羧酸二聚体对称羰基伸缩	1746～1625	s
不对称 C—C(═O)—C 伸缩	1170～1160	m～w	面内 OH 变形	1430～1410	m

续表

基　团	频率 σ/cm⁻¹	强度
C—O 伸缩	1305～1270	w
O—H 伸缩	3200～2500	w
多羧酸类(C ═O 伸缩振动)：		
草酸　α-晶体	1782，1723	s
β-晶体	1711	s
二水合物	1751	s
水溶液	1750	s
丙二酸 β-晶体	1681～1645	s
己二酸	1648	s
顺丁烯二酸　粉末	1723，1697	s
水溶液	1733～1709	s
反丁烯二酸　粉末	1681	s
水溶液	1727～1715	s
酒石酸　α-晶体	1745，1737	s
内消旋水溶液	1732	s
酯		
酯的 C ═O 伸缩振动		
HCOOR	1725～1720	m
RCOOR	1740～1730	m
C ═CCOOR	1730～1715	m
RCOOC ═C	1770～1760	m
ArCOOR	1720	m
ArCOOAs	1750	m
RCOSR	1720～1670	m
ClCOOR	1780～1770	m
H_2NCOOR	1695～1690	m
$ClCH_2COOR$	1750～1740	m
$Cl_2CHCOOR$	1755～1750	m
$(COOR)_2$	1760	m
$CO(OR)_2$	1780～1750	m
(四元环内酯)	1840	m
(五元环内酯)	1790～1770	m
(六元环内酯)	1790～1780	m
	1765～1740	m
(五元环碳酸酯)	1820～1800	m
(六元环碳酸酯)	1850～1800	m
HCOOR		

基　团		频率 σ/cm⁻¹	强度
R—C ═O 伸缩		1385～1375	s
O ═C ═O 变形		775～750	s
CH_3COOR			
R—C ═O 伸缩		850～825	s
O ═C ═O 变形		645～635	s
RCOOR			
R—C ═O 伸缩		870～845	s
O ═C ═O 变形		610～600	s
C ═CCOOR			
R—C ═O 伸缩		850～800	s
酸酐			
$(RCO)_2O$	C ═O 对称伸缩	1825～1810	s
	C ═O 不对称伸缩	1755～1745	m
$(C═C·CO)_2O$, $(ArCO)_2O$	C ═O 对称伸缩	1780～1770	s
	C ═O 不对称伸缩	1725～1715	m
五元环：			
饱和	C ═O 对称伸缩	1875～1865	s
	C ═O 不对称伸缩	1800～1780	s
不饱和	C ═O 对称伸缩	1865～1850	s
	C ═O 不对称伸缩	1780～1770	s
六元环：			
饱和	C ═O 对称伸缩	1820～1800	s
	C ═O 不对称伸缩	1770～1750	s
不饱和	C ═O 对称伸缩	1800～1780	s
	C ═O 不对称伸缩	1740～1730	s
$(CH_3CO)_2O$	C—O 不对称伸缩	1125	w
	C—O 对称伸缩	1000	s
$(RCO)_2O$	C—O 不对称伸缩	1100～1040	w
	C—O 对称伸缩	1100～1040	s
环	C—O 不对称伸缩	1300～1200	s
	C—O 对称伸缩	950～900	—
	环伸缩	650～620	vs
酰卤			
RCOF	C ═O 伸缩振动	1840～1830	s
ArCOF	C ═O 伸缩振动	1810～1800	s
RCOCl(Br)	C ═O 伸缩振动	1810～1790	s
C ═CCOCl	C ═O 伸缩振动	1780～1750	s
ArCOCl	C ═O 伸缩振动	1785～1765	s
ArCOCl	C—C 伸缩振动倍频	1750～1735	m
ArCOCl	C—Cl 伸缩振动	890～850	m
RCOCl	C—Cl 伸缩振动	600～565	m
	O ═C—Cl 变形振动	440～420	s
RCOBr	C—Br 伸缩振动	570～530	m
	O ═C—Br 变形振动	360～320	s

8. 胺的特征拉曼频率

表 21-23　胺的特征拉曼频率

基　团		频率 σ/cm⁻¹	强度
RNH_2	N—H 不对称伸缩	3550～3350	w
	N—H 对称伸缩	3450～3300	s
$ArNH_2$	N—H 不对称伸缩	3500～3400	w
	N—H 对称伸缩	3400～3300	s
$-NH_2$	NH_2 变形振动	1650～1590	w
	NH_2 非平面摇振动，卷曲振动	850～750	—
R_2NH	N—H 伸缩	3500～3300	s
ArNHR	N—H 伸缩	3500～3300	s
RCH_2NH_2	C—N 伸缩	1090～1070	m
R_2CHNH_2	C—N 伸缩	1150～1080	m
R_3CNH_2	C—N 伸缩	1240～1170	m
R_2NH	C—N 伸缩	1145～1130	m
R_2NH	C—N 对称伸缩	900～850	s
$ArNH_2$	C—N 伸缩	1350～1260	s
ArNHR	C—N 伸缩	1340～1320	s
$ArNR_2$	C—N 伸缩	1380～1310	s
R_3N	C—N 对称伸缩	830	s
$N—CH_3$	C—H 对称伸缩	2810～2770	s
	CH_3 对称变形	1440～1410	w
$N—CH_2$	CH_2 对称伸缩	2820～2763	s

9. 含硝基化合物的特征拉曼频率

表 21-24　硝基的特征拉曼频率

基团		频率 σ/cm^{-1}	强度	基团		频率 σ/cm^{-1}	强度
$R—NO_2$	NO_2 不对称伸缩	1560~1545	vw	(X=Cl, Br)			
	NO_2 对称伸缩	1390~1355	m	$N—NO_2$	NO_2 不对称伸缩	1630~1570	m
$C=C—NO_2$	NO_2 不对称伸缩	1550~1500	w		NO_2 对称伸缩	1315~1260	m
	NO_2 对称伸缩	1360~1290	s	$O—NO_2$	NO_2 不对称伸缩	1660~1625	—
$Ar—NO_2$	NO_2 不对称伸缩	1530~1500	w		NO_2 对称伸缩	1285~1270	m
	NO_2 对称伸缩	1370~1330	vs	$—NO_2$	NO_2 变形振动	700~650	m
$R—NO_2$	C—N 伸缩振动	920~830	vs		NO_2 面外弯曲	620~610	w
$Ar—NO_2$	C—N 伸缩振动	850~750	s		NO_2 平面摇摆	560~480	m
$CHXNO_2$	NO_2 对称伸缩	1370~1340	m				

10. 酰胺的特征拉曼频率

表 21-25　酰胺的特征拉曼频率

基团	频率 σ/cm^{-1}		强度	基团	频率 σ/cm^{-1}		强度
	缔合分子	非缔合分子			缔合分子	非缔合分子	
伯酰胺				N—H 面外弯曲	750~700		w
NH_2 不对称伸缩	3350 尖	3500	m	OCN 变形振动	620		s
NH_2 对称伸缩	3180 尖	3400	m	叔酰胺			
酰胺 I 带 (C=O 伸缩)	1650±20	1685±15	m	酰胺 I (C=O 伸缩)	1650±20		m
酰胺 II 带 (N—H 变形)	1640~1620	1620~1585	w	酰胺 III (C—N 伸缩)	1500 尖		m
酰胺 III 带 (C—N 伸缩)	1430~1390	1430~1390	ms	CNC 伸缩 $HCONR_2$	870~820		vs
NH_2 平面摇摆	1150~1100			CNC 伸缩 $RCONR_2$	750~700		vs
OCN 变形振动	600~550		s	OCN 变形振动	650~600		s
仲酰胺				内酰胺			
N—H 伸缩	3320~3270	3460~3400	m	N—H 伸缩	3200 尖		m
酰胺 I 带倍频	3100 尖	3100	w	倍频	3100 尖		w
酰胺 I 带	1680~1630	1700~1660	m	酰胺 I 六元环	1650		m
酰胺 II 带	1570~1510	1550~1510	vw	酰胺 I 五元环	1725±25		m
酰胺 III 带	1300~1250	1250~1200	s	酰胺 I 四元环	1745±15		m

11. 氨基酸的特征拉曼频率

表 21-26　氨基酸的特征拉曼频率

基团	频率 σ/cm^{-1}	强度	基团	频率 σ/cm^{-1}	强度
NH_4^+			COO^-		
N—H 伸缩	3100~3000	w	CO 不对称伸缩	1610~1560	wm
NH_3 不对称变形	1660~1590	mw	CO 对称伸缩	1420~1395	s
NH_3 对称变形	1530~1490	m			

12. 含 —C≡N 和 —N≡C 基团化合物的特征拉曼频率

表 21-27　—C≡N 和 —$\overset{+}{N}\equiv\overset{-}{C}$ 基团的特征拉曼频率

基团	频率 σ/cm^{-1}	强度	基团	频率 σ/cm^{-1}	强度
腈(C—CN)			RR'C=CR''(CN):面外	282~223	w
C≡N 伸缩			面内	242~153	ms,dp
R—CN	2250~2230	vs,p	氰胺(N—CN)		
$CH_3(CH_2)_n—CN$	2250~2245	vs,p	C≡N 伸缩	2225~2210	vs,p
环—CN	2242~2230	s,p	氰酸盐(—O—CN)		
$XCH_2—CN$(X=F,Cl,Br,I)	2260~2244	s,p	C≡N 伸缩	2256~2245	vs,p
$—OCH_2—CN$	2256~2245	s,p	硫氰酸盐(—S—CN)		
$XCH_2—CH_2—CN$(X=O,Cl,Br)	2256~2250	s,p	C≡N 伸缩		
RR'C=CR''(CN)(R,R',R''=H,烷基)	2235~2215	vs	R—S—CN	2157~2155	s,p
ArHC=CAr(CN)	2235~2215	w	Ar—S—CN	2174~2161	s,p
R—C(=O)—CN	2225~2210	vs,p	异氰化物(—C—N≡C),		
苯基氰	2240~2220	s,p	N≡C 伸缩		
C—C≡N 弯曲			R—NC	2146~2134	s,p
$CH_3—CN$	378	vs,dp	$C_6H_5CH_2—NC$	2152	
$GCH_2—CN$:面外	378~370	w	$RO—C(=O)—CH_2—NC$	2166~2164	
面内	307~106	m~s,dp	(R=Me,Et)		
$H_2C=CH(CN)$:面内	242	s	Ar—NC	2125~2109	s,p

13. 含硫化合物的特征拉曼频率

表 21-28 含硫化合物的特征拉曼频率

基团		频率 σ/cm^{-1}	强度	基团		频率 σ/cm^{-1}	强度
RSH, ArSH	S—H 伸缩振动	2600～2550	s	R_2SO_2	SO_2 不对称伸缩	1350～1310	w
	C—S 伸缩振动	735～590	vs		SO_2 对称伸缩	1180～1140	s
RSR	C—S 对称伸缩	700～585	vs		C—S 伸缩	700～650	s
	C—S 不对称伸缩	750～700	s		SO_2 变形振动	580～500	s
RSSR	S—S 伸缩振动	540～510	vs	$(RO)_2SO_2$	SO_2 不对称伸缩	1420～1380	vw
	C—S 伸缩振动	715～620	s		SO_2 对称伸缩	1210～1180	s
$R_2S{=}O$	S=O 伸缩振动	1060～1040	m	RSO_2NH_2	SO_2 不对称伸缩	1370～1300	vw
	C—S 伸缩振动	700～600	s		SO_2 对称伸缩	1180～1140	s
$(RO)_2S{=}O$	S=O 伸缩振动	1210～1200	s				

14. 含磷化合物的特征拉曼频率

表 21-29 有机磷化物伸缩振动特征拉曼频率

基团		频率 σ/cm^{-1}	强度	基团		频率 σ/cm^{-1}	强度
P—H		2440～2275	s		对称	830～740	s
P—C		770～650	s	P—O—Ar	不对称	1260～1160	w
P—Ar		1130～1090	m		对称	995～855	s
P—Cl		580～440	s	P—N—C	不对称	1190～930	w
$P—CH_3$		1310～1280	m		对称	770～680	s
P=S		850～750	s	$R_3P{=}O$		1190～1150	m
P—O—R	不对称	1050～970	w	$(RO)_3P{=}O$		1300～1250	m

15. 含硅化合物的特征拉曼频率

表 21-30 硅化合物的特征拉曼频率

基团		频率 σ/cm^{-1}	强度	基团		频率 σ/cm^{-1}	强度
Si—OH	O—H 伸缩振动	3700～3200	w	Si—O—Si	Si—O 不对称伸缩	1125～1010	w
Si—H	Si—H 伸缩振动	2250～2100	s		Si—O 对称伸缩	540～460	vs
	Si—H 变形振动	950～910	m	Si—O—R	不对称伸缩	1190～1100	m
Si—C	Si—C 不对称伸缩	850～760	w		对称伸缩	850～800	s
	Si—C 对称伸缩	760～550	vs	Si—O—Ar	Si—O 伸缩振动	970～920	m
$Si—CH_3$	CH_3 对称变形	1280～1255	m	Si—Cl	Si—Cl 伸缩振动	620～450	s
Si—Si	Si—Si 伸缩振动	430～400	vs				

表 21-31 有机化合物特征拉曼频率一览表[23]

频率 σ/cm^{-1}	振动	化合物	频率 σ/cm^{-1}	振动	化合物
3400～3330	氢键反对称的 NH_2 伸缩	伯胺类	2986～2974	对称的 NH_3^+ 伸缩	烷基氯化胺类（水溶液）
3380～3340	氢键 OH 伸缩	脂肪醇类	2969～2965	反对称的 CH_3 伸缩	正烷烃类
3374	CH 伸缩	乙炔（气体）	2929～2912	反对称的 CH_2 伸缩	正烷烃类
3355～3325	氢键反对称的 NH_2 伸缩	伯酰胺类	2884～2883	对称的 CH_3 伸缩	正烷烃类
3350～3300	氢键 NH 伸缩	仲胺类	2861～2849	对称的 CH_2 伸缩	正烷烃类
3335～3300	≡CH 伸缩	烷基乙炔类	2850～2700	CHO 基团（2 个谱带）	脂肪醛类
3300～3250	氢键对称的 NH_2 伸缩	伯胺类	2590～2560	SH 伸缩	硫醇类
3310～3290	氢键 NH 伸缩	仲酰胺类	2316～2233	C≡C 伸缩（2 个谱带）	$R—C≡C—CH_3$
3190～3145	氢键对称的 NH_2 伸缩	伯酰胺类	2301～2231	C≡C 伸缩（2 个谱带）	R—C≡C—R'
3175～3145	氢键 NH 伸缩	吡唑类	2300～2250	假反对称的 N=C=O 伸缩	异氰酸酯类
3103	反对称的 $=CH_2$ 伸缩	乙烯（气体）	2264～2251	对称的 C≡C—C≡C 伸缩	烷基连二炔类
3100～3020	CH_2 伸缩	环丙烷	2259	C≡N 伸缩	氨基氰
3100～3000	芳香 CH 伸缩	苯衍生物	2251～2232	C≡N 伸缩	脂肪腈类
3095～3070	反对称的 $=CH_2$ 伸缩	$C=CH_2$ 衍生物	2220～2100	假反对称的 N=C=S 伸缩（2 个谱带）	异硫氰酸烷基酯类
3062	CH 伸缩	苯	2220～2000	C≡N 伸缩	二烷基氨基氰类
3057	芳香 CH 伸缩	烷基苯类	2172	对称的 C≡C—C≡C 伸缩	二乙炔
3040～3000	CH 伸缩	C=CHR 衍生物			
3026	对称的 $=CH_2$ 伸缩	乙烯（气体）			
2990～2980	对称的 $=CH_2$ 伸缩	$C=CH_2$ 衍生物			

续表

频率 σ/cm⁻¹	振动	化合物
2161～2134	$\overset{+}{N}\equiv\overset{-}{C}$ 伸缩	脂肪胩类
2160～2100	C≡C 伸缩	烷基乙炔类
2156～2140	C≡N 伸缩	硫氰酸烷基酯类
2104	反对称的 N=N=N 伸缩	CH_3N_3
2094	C≡N 伸缩	HCN
2049	假反对称的 C=C=O 伸缩	乙烯酮
1974	C≡C 伸缩	乙炔(气体)
1964～1958	反对称的 C=C=C 伸缩	丙二烯类
1870～1840	对称的 C=O 伸缩	饱和五元环酐类
1820	对称的 C=O 伸缩	醋酸酐
1810～1788	C=O 伸缩	酰卤类
1807	C=O 伸缩	光气
1805～1799	对称的 C=O 伸缩	链状酐类
1800	C=C 伸缩	$F_2C=CF_2$
1795	C=O 伸缩	碳酸乙二醇酯
1792	C=C 伸缩	$F_2C=CFCH_3$
1782	C=O 伸缩	环丁酮
1700～1730	C=O 伸缩	卤代醛类
1744	C=O 伸缩	环戊酮
1743～1729	C=O 伸缩	α-氨基酸阳离子(水溶液)
1741～1734	C=O 伸缩	饱和醋酸酯类
1740～1720	C=O 伸缩	脂肪醛类
1739～1714	C=C 伸缩	$C=CF_2$ 衍生物
1736	C=C 伸缩	亚甲基环丙烷
1734～1727	C=O 伸缩	饱和丙酸酯类
1725～1700	C=O 伸缩	脂肪酮类
1720～1715	C=O 伸缩	饱和甲酸酯类
1712～1694	C=C 伸缩	RCF=CFR
1695	非共轭的 C=O 伸缩	尿嘧啶衍生物(水溶液)
1689～1644	C=C 伸缩	单氟代烯烃
1687～1651	C=C 伸缩	次烷基环戊烷类
1686～1636	酰胺 I 谱带	伯酰胺类(固体)
1680～1665	C=C 伸缩	四烷基乙烯类
1679	C=C 伸缩	亚甲基环丁烷
1678～1664	C=C 伸缩	三烷基乙烯类
1676～1665	C=C 伸缩	反式二烷基乙烯类
1675	对称的 C=O 伸缩(环二聚体)	乙酸
1673～1666	C=N 伸缩	醛亚胺
1672	对称的 C=O 伸缩(环二聚体)	甲酸(水溶液)
1670～1655	共轭的 C=O 伸缩	尿嘧啶胞嘧啶和鸟嘌呤衍生物(水溶液)
1670～1630	酰胺 I 谱带	叔酰胺类
1666～1652	C=N 伸缩	酮肟类
1665～1650	C=N 伸缩	缩氨脲(固体)
1663～1636	对称的 C=N 伸缩	醛连氮类,酮连氮类
1660～1654	C=C 伸缩	顺式二烷基乙烯类
1660～1650	酰胺 I 谱带	仲酰胺类
1660～1649	C=N 伸缩	醛肟类
1660～1610	C=N 伸缩	脒类(固体)
1658～1644	C=C 伸缩	$R_2C=CH_2$
1656	C=C 伸缩	环乙烯,环庚烯
1654～1649	对称的 C=O 伸缩(环二聚体)	羧酸类
1652～1642	C=N 伸缩	硫代缩氨脲类(固体)
1650～1590	NH_2 剪式振动	伯胺类
1649～1625	C=C 伸缩	烯丙基衍生物
1648～1640	N=O 伸缩	亚硝酸烷基酯类
1648～1638	C=C 伸缩	$H_2C=CHR$
1647	C=C 伸缩	环丙烯
1638	C=O 伸缩	二硫碳酸乙二醇酯
1637	对称的 C=C 伸缩	异戊二烯
1634～1622	反对称的 NO_2 伸缩	硝酸烷基酯类
1630～1550	环伸缩(双峰)	苯衍生物
1623	C=C 伸缩	乙烯(气体)
1620～1540	二个或多个偶合的 C=C 伸缩	多烯类
1616～1571	C=C 伸缩	氯代烯类
1614	C=C 伸缩	环戊烯
1596～1547	C=C 伸缩	溴代烯类
1581～1565	C=C 伸缩	碘代烯类
1575	对称的 C=C 伸缩	1,3-环己二烯
1573	N=N 伸缩	偶氮甲烷(溶液)
1566	C=C 伸缩	环丁烯
1560～1550	反对称的 NO_2 伸缩	伯硝基烷类
1555～1550	反对称的 NO_2 伸缩	仲硝基烷类
1548	N=N 伸缩	1-吡唑啉
1545～1535	反对称的 NO_2 伸缩	叔硝基烷类
1515～1490	环伸缩	呋喃甲基
1500	对称的 C=C 伸缩	环戊二烯
1480～1470	OCH_3,OCH_2 变形	脂肪醚类
1480～1460	环伸缩	呋喃亚甲基或呋喃甲酰基
1473～1446	CH_3,CH_2 变形	正烷烃类
1466～1465	CH_3 变形	正烷烃类
1450～1400	假反对称的 N=C=O 伸缩	异氰酸酯类
1443～1898	环伸缩	2-取代噻吩类
1442	N=N 伸缩	偶氮苯
1440～1340	对称的 CO_2^- 伸缩	羧酸盐离子类(水溶液)
1415～1400	对称的 CO_2^- 伸缩	α-氨基酸偶极离子和阳离子(水溶液)
1415～1385	环伸缩	蒽类
1395～1380	对称的 NO_2 伸缩	伯硝基烷类
1390～1370	环伸缩	萘类
1385～1368	CH_3 对称变形	正烷烃类
1375～1360	对称的 NO_2 伸缩	仲硝基烷类
1355～1345	对称的 NO_2 伸缩	叔硝基烷类
1350～1330	CH 变形	异丙基
1320	环振动	1,1-二烷基环丙烷类
1314～1290	CH_2 面内变形	反式二烷基乙烯类
1310～1250	酰胺 Ⅲ 谱带	仲酰胺类
1310～1175	CH_2 扭转和面内摇摆	正烷烃
1305～1295	CH_2 面内扭转	正烷烃

续表

频率 σ/cm^{-1}	振　　动	化合物
1300～1280	CC 桥键伸缩	联苯类
1282～1275	对称的 NO_2 伸缩	硝酸烷基酯类
1280～1240	环伸缩	环氧衍生物
1276	对称的 N═N═N 伸缩	CH_3N_3
1270～1251	面内 CH 变形	顺式二烷基乙烯类
1266	环"呼吸"	环氧乙烷
1230～1200	环振动	对位二取代苯
1220～1200	环振动	单-或 1,2-二烷基环丙烷类
1212	环"呼吸"	氮杂环丙烷
1205	C_6H_5—C 振动	烷基苯类
1196～1188	对称的 SO_2 伸缩	硫酸烷基酯类
1188	环"呼吸"	环丙烷
1172～1165	对称的 SO_2 伸缩	磺酸烷基酯类
1150～950	CC 伸缩	正烷烃类
1145～1125	对称的 SO_2 伸缩	二烷基砜类
1144	环"呼吸"	吡咯
1140	环"呼吸"	呋喃
1130～1100	对称的 C═C═C 伸缩(2 个谱带)	丙二烯类
1130	假 C═C═O 伸缩	乙烯酮
1112	环"呼吸"	硫杂环丙烷
1111	NN 伸缩	肼
1070～1040	S═O 伸缩(1 个或 2 个谱带)	脂肪亚砜类
1065	C═S 伸缩	三硫代碳酸乙二醇酯类
1060～1020	环振动	邻位二取代苯
1040～990	环振动	吡唑类
1030～1015	CH 面内变形	单取代苯类
1030～1010	三角形环"呼吸"	3-取代吡啶类
1030	三角形环"呼吸"	吡啶
1029	环"呼吸"	氧杂环丁烷
1026	环"呼吸"	氮杂环丁烷
1010～990	三角形环"呼吸"	单,间位和 1,3,5-取代苯
1001	环"呼吸"	环丁烷
1000～985	三角形环"呼吸"	2-和 4-取代吡啶
992	环"呼吸"	苯
992	环"呼吸"	吡啶
939	环"呼吸"	1,3-二氧杂环戊烷
933	环振动	烷基环丁烷
930～830	对称的 COC 伸缩	脂肪醚类
914	环"呼吸"	四氢呋喃
906	ON 伸缩	羟胺
905～837	CC 骨架伸缩	正烷烃类
900～890	环振动	烷基环戊烷类
900～850	对称的 CNC 伸缩	仲胺
899	环"呼吸"	四氢吡咯
866	环"呼吸"	环戊烷
877	OO 伸缩	过氧化氢
851～840	假对称的 CON 伸缩	烷基羟胺
836	环"呼吸"	哌嗪
835～749	骨架伸缩	异丙基
834	环"呼吸"	1,4-二氧六环
832	环"呼吸"	噻吩
832	环"呼吸"	吗啉
830～720	环振动	对位二取代苯
825～820	C_3O 骨架伸缩	仲醇类
818	环"呼吸"	四氢吡喃
815	环"呼吸"	哌啶
802	环"呼吸"	环己烷(椅式)
785～700	环振动	烷基环己烷类
760～730	C_4O 骨架伸缩	叔醇类
760～650	对称的骨架伸缩	叔丁基
740～585	CS 伸缩(1 个或多个谱带)	烷基硫化物
735～690	"C═S 伸缩"	硫酰胺类,硫脲类(固体)
733	环"呼吸"	环庚烷
730～720	CCl 伸缩,P_C 构象	伯氯代烷类
715～620	CS 伸缩(1 个或多个谱带)	二烷基二硫化物类
709	CCl 伸缩	CH_3Cl
703	环"呼吸"	环辛烷
703	对称的 CCl_2 伸缩	CH_2Cl_2
690～650	假对称的 N═C═S 伸缩	异硫氰酸烷基酯类
688	环"呼吸"	四氢噻吩
668	对称的 CCl_3 伸缩	$CHCl_3$
660～650	CCl 伸缩,P_H 构象	伯氯代烷类
659	对称的 CSC 伸缩	硫杂环己烷
655～640	CBr 伸缩,P_C 构象	伯溴代烷类
630～615	环变形	单取代苯类
615～605	CCl 伸缩,S_{HH}构象	仲氯代烷类
610～590	CI 伸缩,P_C 构象	伯碘代烷类
609	CBr 伸缩	CH_3Br
577	对称的 CBr_2 伸缩	CH_2Br_2
570～560	CCl 伸缩,T_{HHH}构象	叔氯代烷类
565～560	CBr 伸缩,P_H 构象	伯溴代烷类
540～535	CBr 伸缩,S_{HH}构象	仲溴代烷类
539	对称的 CBr_3 伸缩	$CHBr_3$
525～510	SS 伸缩	二烷基二硫化物
523	CI 伸缩	CH_3I
520～510	CBr 伸缩,T_{HHH}构象	叔溴代烷类
510～500	CI 伸缩,P_H 构象	伯碘代烷类
510～480	SS 伸缩	二烷基三硫化物
495～485	CI 伸缩,S_{HH}构象	仲碘代烷类
495～485	CI 伸缩,T_{HHH}构象	叔碘代烷类
484～475	骨架变形	二烷基乙炔类
483	对称的 CI_2 伸缩	CH_2I_2
459	对称的 CCl_4 伸缩	CCl_4
437	对称的 CI_3 伸缩	CHI_3(溶液)
425～150	"椅式伸展"	正烷烃类
355～335	骨架变形	单烷基乙炔类
267	对称的 CBr_4 伸缩	CBr_4(溶液)
200～160	骨架变形	脂肪腈类
178	对称的 CI_4 伸缩	CI_4(固体)

二、无机化合物的特征拉曼频率

表 21-32 一些重要的三、四、五原子无机离子的特征拉曼频率[1]

离子（点群）	ν_1 带 σ/cm^{-1}（振动类型，对称类型）				ν_2 带 σ/cm^{-1}（振动类型，对称类型）				ν_3 带 σ/cm^{-1}（振动类型，对称类型）				ν_4 带 σ/cm^{-1}（振动类型，对称类型）			
	在 H_2O 中	晶态	强度 R	强度 IR	在 H_2O 中	晶态	强度 R	强度 IR	在 H_2O 中	晶态	强度 R	强度 IR	在 H_2O 中	晶态	强度 R	强度 IR
$D_{\infty h}$		$\nu_{sym}(\Sigma_g^+)$				π				$\nu^{as}(\Sigma_u^+)$						
N_3^-	1350	1380~1320	vs		635	660~630			2070	2180~2010		vs				
NO_2^+	1400		vs		570				2360			vs				
FHF^-	—	610~585	vs		1225	1260~1200	m	m	1535	1720~1400		vs				
$C_{\infty v}$																
OCN^-	1252,1205	1215~1200	s	w	627	640~590		m	2159 p	2220~2100	s	s				
SCN^-	745		s	w	470	490~420	w	w	2065 p	2150~2040	vs	s				
C_{2v}		$\nu_{sym}(A_1)$				$\delta(A_1)$				$\nu^{as}(B_1)$						
NO_2^-	1330	1380~1320	s	s	815	835~825	m	s	1230	1250~1200	m	vs				
D_{3h}		$\nu_{sym}(A_1')$				$\pi(A_2'')$				$\nu^{as}(E')$				$\delta(E')$		
BO_3^{3-}	910 p	1000~985	vs		750	750~680		s		1460~1350		vs		560~500	m	m
NO_3^-	1050 p	1060~1020	vs		825	835~780	w	s	1400		m	vs	720	740~710	m	w
CO_3^{2-}	1060 p	1090~1050	vs		880	890~850		m	1425	1450~1380	w	vs	680	740~610	w	m
C_{3v}		$\nu_{sym}(A_1)$				$\delta(A_1)$				$\nu^{as}(E)$				$\delta(E)$		
SO_3^{2-}	965 p	990~950	vs	s	615 p	650~620	w	m	950	970~890	m	s	470	520~470	s	m
ClO_3^-	930 p	985~916	s		625 p	625~600			980	1040~965	m	s	480	500~450		
BrO_3^-	800 p	835~770	s		440 p	445~420			830	820~800	m	s	350			
IO_3^-	780 p	785~695	s		390 p	415~400	w	w	825	850~760	m	s	330			
OH_3^+	3380~3180		m	vs	1180~1150		m	m	3380~3230		m	vs	1700~1600		m	s
T_d		$\nu_{sym}(A_1)$				$\delta(E)$				$\nu^{as}(F_2)$				$\delta(F_2)$		
NH_4^+	3040 p		s		1680				3145			s	1400	1430~1390		s
ND_4^+	2215 p		s		1215				2350			s	1065			
PO_4^{3-}	935 p	975~960	vs		405	620~540	w	m	1080	1100~1030		s	450	500~400		
SO_4^{2-}	980 p	1010~970	vs		615	620~610	w	m	1100	1140~1080	w	vs	450		w	
ClO_4^-	930 p	940~930	vs		625				1130	1140~1080			460			
IO_4^-	790 p		vs		325				850				255			
MnO_4^-	840 p	860~840	vs		430				920	940~880			355			
CrO_4^{2-}	850 p	865~840	vs		370				885	915~870			350			
AsO_4^{3-}	810 p		vs		340				870			vs	400			
AlH_4^-	1740 p	1663	s	s	809	900~805	w	m	1740	1785		vs	745	800~700	s	s
BF_4^-	770 p		vs	s	525		w	s	985		s	vs	355		w	s

表 21-33 一些结构较复杂的无机离子的特征拉曼频率[3]

离子	振动类型和谱带位置 ν/cm⁻¹	强度 R	强度 IR	振动类型和谱带位置 ν/cm⁻¹	强度 R	强度 IR	振动类型和谱带位置 ν/cm⁻¹	强度 R	强度 IR	振动类型和谱带位置 ν/cm⁻¹	强度 R	强度 IR	振动类型和谱带位置 ν/cm⁻¹	强度 R	强度 IR	振动类型和谱带位置 ν/cm⁻¹	强度 R	强度 IR
$S_2O_3^{2-}$	ν_{S-S}			ν_{SO_3} sym			ν_{SO_3} as		s	δ_{SO_3} sym			δ_{SO_3} as			δ_{S-O}		
在 H_2O 中	670	s	s	995	vs	s	1125		vs	445			540			335	m	
晶态	550~640	s	s	1010~950			1150~1080						520~540					
HSO_3^-	ν_{S-H}			ν_{SO_3} sym			ν_{SO_3} as			δ_{SO_3} sym			δ_{SO_3} as			δ_{HSO}		
在 H_2O 中	2515	s	w	1040	vs	s	1195	m	vs	510	s	s	625	m	s	1135	m	s
$HO-SO_3^-$	ν_{S-O}			ν_{SO_3} sym			ν_{SO_3} as			δ_{SO_3} sym			δ_{SO_3} as			δ_{SOH}		
在 H_2O 中	885		s	1050	vs	vs	1200		vs	595	s		585		s	430	s	
晶态	900~850		s	1060~1020	vs	vs	1300~1170		vs	680~565		s	620~550		vs	480~450	s	
HPO_3^{2-}	ν_{P-H}			ν_{PO_3} sym			ν_{PO_3} as			δ_{PO_3} sym			δ_{PO_3} as			δ_{HPO}		
在 H_2O 中	2315	s	m	980	s	s	1085		vs	565		m	465		m	1025		
				990~920	s	s	1095~970		vs									
$HO-PO_3^{2-}$	ν_{P-O}			ν_{PO_3} sym			ν_{PO_3} as			δ_{PO_3} sym			δ_{PO_3} as					
在 H_2O 中	890		s	970	vs	s	1095		vs	530			380					
晶态	860		s	990	vs	s	1150~1040		vs	515			535					
$(HO)_2PO_2^-$	ν_{P-O} sym			ν_{PO_2} sym			ν_{PO_2} as			δ_{PO}			c			δ_{POH}		s
在 H_2O 中	875	s		1075	s	vs	1150	m	vs	935		s	1230			1360		
$HO-CO_2^-$	ν_{C-O}			ν_{CO_2} sym			ν_{CO_2} as			δ_{COH}			δ_{CO}			π		
在 H_2O 中	960		m	1340	vs	vs	1656	m	vs	710		m	580		w	835	m	
晶态	1050~970		m	1450~1350	s	vs	1660~1615	m	vs	680~635		m						
$C_2H_5OPO_3^{2-}$	ν_{PO_3} sym			ν_{PO_3} as			ν_{CCO} sym			ν_{CCO} as			δ_{PO_3} sym			δ_{PO_3} as		
晶态	1025~965	s	s	1150~1120	s	vs	730	s	w	915		s	530~415	s	m	560	w	s
$C_2H_5OSO_3^-$	ν_{SO_3} sym			ν_{SO_3} as			ν_{CCO} sym			ν_{CCO} as			δ_{SO_3} sym			δ_{SO_3} as		
晶态	910~840	s	s	965~925	s	vs	570~555	s	w	705~685	w	s	365	s	m		w	s

表 21-34 非离子型常见无机化合物的特征拉曼频率[9]

化合物	振动类型	带的位置 σ/cm^{-1}	强度 R	强度 IR	振动类型	带的位置 σ/cm^{-1}	强度 R	强度 IR	振动类型	带的位置 σ/cm^{-1}	强度 R	强度 IR
H_2O	ν_{O-H} sym	3450,b	s	vs	ν_{O-H}as	3450,br	s	vs	δ_{OH_2}	1640	m	vs
D_2O	ν_{O-D} sym	2550	s	vs	ν_{O-D}as	2550	s	vs	δ_{OD_2}	1220	m	vs
H_2O_2	ν_{O-H}	3400,b	s	vs	ν_{O-O}	880	vs		δ_{O-H}	1400,1350		
H_2SO_4	ν_{O-H}	3000,b	w	vs	ν_{SO_2} sym	1140	vs	vs	ν_{SO_2}as	1370	w	vs
	ν_{S-O} sym	910	vs	s	ν_{S-O}as	970	w	vs	δ_{SO_2}	560	s	s
	δ_{S-O}	390	s	w								
HNO_3	ν_{O-H}	3400,b	w	s	ν_{NO_2} sym	1300	vs	s	ν_{NO_2}as	1675	m	vs
	ν_{N-O}	925	vs	s	δ sym	680	s		δas	610		s
$HClO_4$	ν_{O-H}	3000,b	w	s	ν_{ClO_3} sym	1035	vs	s	ν_{ClO_3}as	1230	w	vs
	ν_{Cl-O}	740	s	s	δ_{ClO_3}	575	s	m				
$SOCl_2$	ν_{S-O}	1230	s	vs	ν_{SCl_2} sym	490	vs	s	ν_{SCl_2}as	440		vs
	δ_{OSCl}	394	m	m	δ_{SCl_2}	195	s					
SO_2Cl_2	ν_{SO_2} sym	1205	vs	s	ν_{SO_2}as	1435	w	vs	ν_{SCl_2} sym	405	vs	s
	ν_{SCl_2}as	580	m	vs	δ_{SO_2}	580			δ_{SCl_2}	210		
PCl_3	ν_{P-Cl} sym	505	vs	s	ν_{P-Cl}as	490	w	vs	δsym	200	s	s
	δ^{as}	250	m	s								
PBr_3	ν_{P-Br} sym	380	vs	s	ν_{P-Br} as	400	w	vs	δsym	115	s	s
	δ^{as}	160	m	s								
$POCl_3$	$\nu_{P=O}$	1290	m	s	ν_{P-Cl} sym	485	vs	s	ν_{P-Cl} as	580	w	vs
Al_2Cl_6	νsym(t)	505	s	w	νsym(b)	340	s	w	δ_{AlCl_2}	215	s	m
	ν^{as}(t)	625	w	s	ν^{as}(b)	420	w	s				

表 21-35 一些常见无机化合物的拉曼谱带位置(σ)和强度

σ/cm^{-1}	强度	σ/cm^{-1}	强度	σ/cm^{-1}	强度	σ/cm^{-1}	强度
$NaBO_2 \cdot 4H_2O$		926	m	235	w		
170	m	3100	m	675	vw	1042	s
205	m	3390	m	700	vw	1260	m
228	w	$NaBO_3 \cdot 4H_2O$		1059	s	1390	mw
380	w	170	w	1372	vw	1430	w
410	w	265	w	1420	vw	1700	w
510	w	310	w	1438	vw	2845	m
530	w	508	m	$CaCO_3$		3070	s,b
545	w	710	m	155	m	$NaHCO_3$	
745	s	915	s	280	m	90	m
950	m	970	m	710	w	111	m
3190	vs	3400	s	1084	s	141	m
3290	vs	3570	m	1434	w	205	w
3570	vs	H_3BO_3		$BaCO_3$		225	w
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$		211	m	135	s	658	w
352	w	502	m	150	s	684	m
390	w	882	s	690	w	1045	s
464	w	1170	w	1060	s	1267	m
579	s	3164	s	$PbCO_3$		1432	w
760	w,b	3240	s	108	s	$KHCO_3$	
950	w	Li_2CO_3		420	w,b	79	s
3420	s	95	s	685	w	106	s
3570	s	126	mw	1051	s	137	m
$K_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$		156	m	1395	m,b	183	m
355	w	192	m	3540	m	635	m
402	w	711	vw	NH_4HCO_3		675	m
460	w	748	vw	55	w	1023	s
575	s	1089	s	79	w	1278	m,b
770	w	1459	w	97	m	NaCN	
980	w	Na_2CO_3		112	s	1068	w
3270	s	700	vw	127	s	2085	s
3370	s	1078	s	150	w	KCN	
3560	s	1430	vw	175	w	2070	s
$NH_4HB_4O_7 \cdot 3H_2O$		K_2CO_3		220	m	KCNO	
522	m	132	m	650	w	125	vs
560	m	182	m	700	m	638	m

续表

σ/cm⁻¹	强度
1190	w
1208	s
1300	m
1315	w
2164	m
NH_4SCN	
45	s
52	s
65	m
90	s
165	m,b
752	m
1408	w
1666	w
2062	s
2074	s
3045	m
3115	m
$NaSCN \cdot 2H_2O$	
60	s
105	s
120	s
190	m
300	w
754	m
945	w
1610	w
1670	w
2080	vs
3415	m
KSCN	
68	s
97	m
122	s
485	w
748	m
970	w
2050	vs
$NaNO_2$	
119	s
154	m
827	m
1325	s
KNO_2	
804	m
1250	sh
1320	s
NH_4NO_3	
82	m
136	m
167	m
710	w
1038	s
1415	w
1455	w
1650	w
3120	w,b
3220	w,b
$NaNO_3$	
102	m
190	m
725	w
1069	s

σ/cm⁻¹	强度
1387	w
KNO_3	
50	s
83	s
124	w
714	w
1049	s
1345	w
1360	w
$AgNO_3$	
134	w
731	w
1044	s
$Ca(NO_3)_2$	
95	m
125	m
157	m
720	w
742	w
750	w
1050	s
1355	w,b
3500	m,b
$Sr(NO_3)_2$	
108	s
131	w
165	m
182	s
737	m
1057	vs
1405	w
1425	w
1631	w
$Ba(NO_3)_2$	
77	s
139	m
220	vw
729	w
1044	s
1385	vw
1401	vw
1630	vw
$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	
1060	s
$Pb(NO_3)_2$	
95	m
124	m
145	m
160	m
731	w
1045	s
1612	w
NH_4Cl	
90	m
140	m
168	m
1400	m
1708	s
2820	m
3045	vs
3140	vs
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	
416	w

σ/cm⁻¹	强度
550	w
940	m
1005	w
3340	m,b
$Ca_3(PO_4)_2$	
430	w
590	w
960	s
1045	w
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	
390	w
510	w
540	w
570	w
863	w
948	s
1065	m
1140	w
3120	m,b
3370	m
3440	m
Na_2HPO_4	
380	w
400	w
515	w,b
860	m
980	m
1065	w,b
3460	m,b
K_2HPO_4	
390	w
440	w
535	w
560	w
574	w
880	m
952	s
1050	w
1083	w
$NaH_2PO_4 \cdot 2HO$	
390	w,b
530	m
550	m
913	s
950	m
1000	m
KH_2PO_4	
364	w
395	w
480	w
535	w
917	s
$Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$	
165	w
335	m,b
490	w,b
530	w
758	m
964	m
990	s
1100	s
1143	w
3380	m

σ/cm⁻¹	强度
3630	m
Sb_2O_3	
87	m
120	w
143	w
192	m
256	s
375	w
453	m
715	w
$(NH_4)_2SO_3$	
450	m
615	m
973	s
1415	vw
1660	vw
3140	m,b
Na_2SO_3	
94	w
500	m
642	w
952	m
990	s
K_2SO_3	
482	m
635	w
952	m
975	s
$(NH_4)_2SO_4$	
445	m
610	w
620	w
968	s
1080	w,b
1410	vw
1663	vw
3130	m,b
$Li_2SO_4 \cdot H_2O$	
398	w,b
487	w,b
638	w
1008	s
1100	w
1150	w
1177	w
3450	m,b
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	
450	w
464	w
518	w
630	w
645	w
990	s
1100	w
1130	w
1150	w
K_2SO_4	
452	m
618	m
980	s
1090	w
1105	w
1143	w

续表

σ/cm⁻¹	强度	σ/cm⁻¹	强度	σ/cm⁻¹	强度	σ/cm⁻¹	强度
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$		1268	m	443	s	1289	m
412	w	NH_4HSO_4		536	w	$Na_2S_2O_4$	
490	w	410	m	650	w	40	w
617	w	445	m	665	m	62	w
667	w	580	m	998	m	95	m
1005	s	610	m	1126	w	132	m
1133	m	880	m	1144	w	177	m
3400	m	1014	s	1162	m	252	s
3490	m	1040	s	3420	w,b	359	s
$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$		3160	m	$Na_2S_2O_5$		502	vw
450	w	$NaHSO_4$		48	w	902	vw
610	w	410	m	63	m	1027	m
625	w	420	w	90	m	1040	w
981	s	435	m	200	m	1064	w
3280	m,b	463	m	225	m	$Na_2S_2O_6 \cdot 2H_2O$	
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$		580	m	273	s	292	s
80	m	600	m	317	m	333	m
278	w	865	m	429	s	541	w
460	w	1005	m	512	w	555	w
610	w	1038	s	530	w	706	m
980	s	1062	s	552	w	1097	s
1094	w	1130	m	655	s	1215	m
1140	w	1240	w,b	974	w	3475	m
3200	w,b	3470	s	1059	s	3560	m
$ZrSO_4$		$KHSO_4$		1083	w	$NaClO_3$	
69	m	413	m	1175	w	64	w
110	w	447	m	1198	w	129	m
119	m	572	w	$(NH_4)_2S_2O_8$		177	w
134	m	583	m	220	w	480	m
190	m	591	m	322	w	622	w
215	w	615	w	424	w	933	s
230	w	855	m	553	w	955	w
310	w	874	w	570	w	965	w
334	w	1003	s	630	w	985	w
433	m	1027	s	642	w	1024	w
470	m	1167	w	806	s	$KClO_3$	
645	w	1240	w	1073	s	98	m
680	w	$(NH_4)_2S_2O_3$		1227	w	130	w
1027	m	72	s	1280	w	485	m
1040	s	356	m	3175	w	618	w
1080	w	467	s	$Na_2S_2O_8$		937	s
1130	m	534	w	112	m	976	m
1152	m	544	w	243	w	$NaClO_4$	
1650	vw	677	m	348	w	450	m
3160	m,b	985	m	422	w	474	w
$BaSO_4$		1112	w,b	559	w	632	m
71	m	1440	w	646	w	952	s
451	m	1665	w,b	836	s	1090	w
460	m	3090	m,b	855	s	1145	w
616	w	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$		1090	s	3530	m
627	w	50	m	1265	w	$KClO_4$	
645	w	68	m	1295	m	460	s
985	s	321	w	$K_2S_2O_8$		627	m
1082	vw	345	w	65	w	940	s
1102	vw	432	s	227	w	1083	w
1138	w	545	w	320	w	1122	w
1164	w	672	w	420	w	$Mg(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$	
$Fe(NH_4)(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$		1015	m	553	w	468	m
175	w,b	1115	m	567	w	635	m
307	m	1162	w	640	w	937	s
460	w	3415	m	812	s	1115	w,b
640	w	$K_2S_2O_3 \cdot H_2O$		1080	s	3530	m,b
1034	s	345	w	1263	w		

续表

σ/cm^{-1}	强度	σ/cm^{-1}	强度	σ/cm^{-1}	强度	σ/cm^{-1}	强度
$NaBrO_3$		804	m	328	w	340	m
75	w	834	w	345	w	357	m
114	w	$NaIO_3$		370	w	378	m
131	w	74	m	735	s	828	s
149	w	95	m	753	vs	835	s
358	w	110	m	782	m	$Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$	
374	w	310	w	810	m	335	m
442	vw	350	w	KIO_3		840	w
457	vw	377	w	71	w	893	w
798	s	394	w	89	w	930	s
822	vw	712	w	275	w	3300	w,b
844	w	743	vs	293	w	S	
$KBrO_3$		758	m	336	m	52	s
157	w,b	778	m	795	s	84	m
357	m	793	m	844	m	154	s
420	vw	815	s	855	w	218	s
777	s	KIO_3		$PbCrO_4$		456	s
790	s	302	w	143	m	472	s

第六节　激光拉曼光谱的定量分析[10]

一、激光拉曼光谱定量分析原理

由 Placzek 理论可知，当气体样品中含 N 个分子，并以 90°方式收集散射光时，Stoker 拉曼谱带的强度 I 由下列方程式表示：

$$I=KI_0N\frac{(\nu_0-\nu)^4}{\nu(1-e^{-h\nu/kT})}\sum_{ij}\left(\frac{\partial\alpha_{ij}}{\partial Q}\right)^2 \tag{21-18}$$

式中，K 是系数，其值仅和方程中其他量所取单位有关；I_0 和 ν_0 是激发光的强度和频率；ν 是分子的简正振动频率；k 是 Boltzmann 常量；T 是绝对温度；$\sum_{ij}(\partial\alpha_{ij}/\partial Q)^2$ 是对所有的极化率张量的分量对简正坐标 Q 的偏导数的平方求和。若所有的测量条件包括 I_0，ν_0，T，被照射的体积，检测器和记录仪的灵敏度都保持不变，对任何谱带，方程（21-18）可简写为：

$$I=a_0c \tag{21-19}$$

式中 c 是浓度；a_0 是比例系数。

在液相中散射指数 a_1 由下式确定

$$a_1=a_0GFL \tag{21-20}$$

式中，因子 G 是光学效应，它和液体的折射指数 n 有关，$G=1/n^2$；因子 F 是样品中的内部场效应，它亦和折射指数有关，因子 L 是特殊的分子间相互作用的效应，它导致配合物的形成。

实验测量拉曼散射辐射强度 I 可用式（21-21）表示：

$$I=ac \tag{21-21}$$

式中，a 是在一定的测量条件和介质下，分子指定谱带的特征常数，应用（21-21）式可计算被测物浓度。但在实验中要得到它们之间的直线关系是比较困难的，因为拉曼谱带的强度还受到仪器和样品的许多因素的影响，包括光源功率的稳定性，单色器的光谱狭缝宽度，样品池的大小，样品的自吸收，由于样品浓度不同引起的折射指数的变化和溶剂中的背景噪音等等。其中有些因素是难以控制的，因此直接比较不同浓度样品间的拉曼谱带强度来定量是困难的，最有效的方法是利用加入内标的方法。

二、激光拉曼光谱定量分析一般步骤

激光拉曼光谱定量分析的一般步骤如下：

(1) 由拉曼光谱鉴定样品的组分。

(2) 选择适当强度的分析谱带，该谱带不与样品的其他谱带重叠。

(3) 选择内标，内标的谱带与分析谱带邻近，但不重叠。

(4) 配制组成近似于样品的一组标准样品，标准样品和被测样品中都加入一定量的内标物。

(5) 在相同的实验条件下测定一组标准样品和被测样品中分析谱带与内标谱带的强度比(通常比较拉曼峰的高度或面积)。

(6) 绘制 C_M/C_K-A_M/A_K 工作曲线，C_M 和 C_K 是标准样品中被测组分和内标物的浓度或重量，A_M 和 A_K 是标准样品中分析谱带和内标谱带强度。

(7) 测定被测样品的 A_M/A_K 由工作曲线可求得被测物浓度或含量。

在拉曼光谱定量分析中所选择的内标必须：①化学性质稳定，不与样品中被测成分或其他成分发生化学反应；②内标拉曼线和被分析的拉曼线互不干扰；③内标应比较纯，不含有被测成分。

对于非水溶液，常用的内标为四氯化碳 ($459cm^{-1}$)；而对于水溶液，常用的内标是硝酸根离子 ($1050cm^{-1}$) 和高氯酸根离子 ($930cm^{-1}$)。在某些情况下，还可用溶剂的拉曼线作内标线，对固体样品，有时可选择样品中某一拉曼线作内标线。

拉曼光谱定量分析能用于水溶液分析且准确度较高，因为拉曼线的强度 (或峰高) 直接正比于样品浓度。激光拉曼光谱分析法往往可同时测定多种组分，其缺点是灵敏度较低，一般的检定限在 μg/ml 数量级。为了提高定量分析的灵敏度和克服激光功率波动和溶剂背景强度限制了提高信噪比的两个主要因素，可采用激光共振拉曼光谱法和 SERS 光谱法。

第七节　部分有机化合物拉曼光谱图

下面给出的 60 张拉曼光谱图 (图 21-36 至图 21-95) 引自 F.R. 多林希等著“有机化合物的特征拉曼频率”一书，谱图是用激光激发改装的 Cary-81 型拉曼光谱仪记录的，使用光谱物理公司的 165/265 型氩离子激光器在 488nm 线工作，高纯度的样品装在 Pyrex 毛细管中，与激光同轴方向照射。

表 21-36 给出了有机化合物拉曼光谱的名词索引。

表 21-36　拉曼谱图的名词索引

谱图号	化合物	物理状态	谱图号	化合物	物理状态	谱图号	化合物	物理状态
21-36	正庚烷	液体	21-48	三乙胺	液体①	21-60	反-3-辛烯	液体
21-37	2-甲基己烷	液体	21-49	1-硝基戊烷	液体	21-61	环己烯	液体
21-38	3,3-二甲基戊烷	液体	21-50	硝酸正丙酯	液体	21-62	辛醛	液体
21-39	2,2,3-三甲基丁烷	液体	21-51	1-己硫醇	液体	21-63	2-戊酮	液体
21-40	环己烷	液体	21-52	二苄硫醚	液体	21-64	2,4-戊二酮	液体
21-41	1-氯丁烷	液体	21-53	二丙基二硫化物	液体	21-65	丙酸	液体
21-42	2-氯丁烷	液体	21-54	硫代乙酰胺	液体	21-66	甲酸甲酯	液体
21-43	1-丙醇	液体	21-55	二甲基亚砜	液体	21-67	丙烯酸正丁酯	液体
21-44	二丙醚	液体	21-56	1-辛烯	液体	21-68	乙酐	液体
21-45	乙缩醛	液体	21-57	2,3-二甲基-1-丁烯	液体	21-69	甲酰胺	液体
21-46	正丁胺	液体①	21-58	2-庚烯(顺式和反式)	液体	21-70	N,N-二甲基甲酰胺	液体
21-47	二丙胺	液体	21-59	顺-3-辛烯	液体	21-71	丁醛肟	液体

续表

谱图号	化合物	物理状态	谱图号	化合物	物理状态	谱图号	化合物	物理状态
21-72	丁酮肟	液体	21-80	叔丁苯	液体	21-88	1,2-二甲苯	液体
21-73	异氰酸苯酯	液体	21-81	氟苯	液体	21-89	1-氯-2-甲苯	液体
21-74	1-己炔	液体	21-82	氯苯	液体	21-90	1,2-二氯苯	液体
21-75	乙腈	液体	21-83	溴苯	液体	21-91	联苯	粉末
21-76	苯甲腈	液体	21-84	苯酚	液体	21-92	萘	液体
21-77	苯	液体	21-85	硝基苯	液体	21-93	噻吩	液体
21-78	甲苯	液体	21-86	α-甲基苯乙烯	液体	21-94	1,4-二氧六环	液体
21-79	异丙苯	液体	21-87	苯甲酸甲酯	液体	21-95	吡啶	液体

① 新蒸馏的样品。

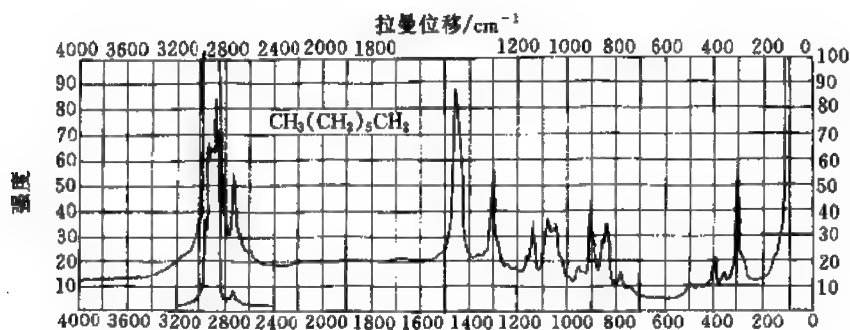


图 21-36 正庚烷

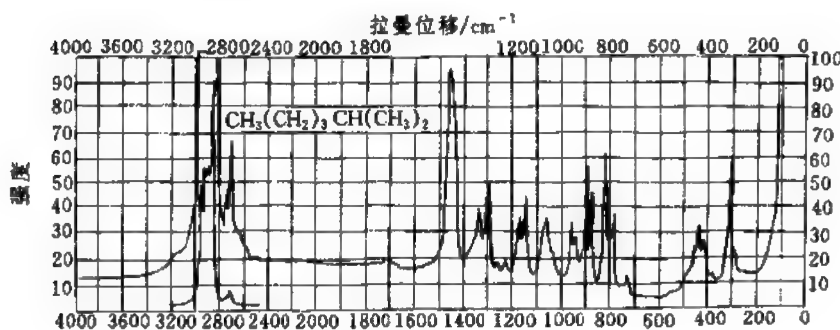


图 21-37 2-甲基己烷

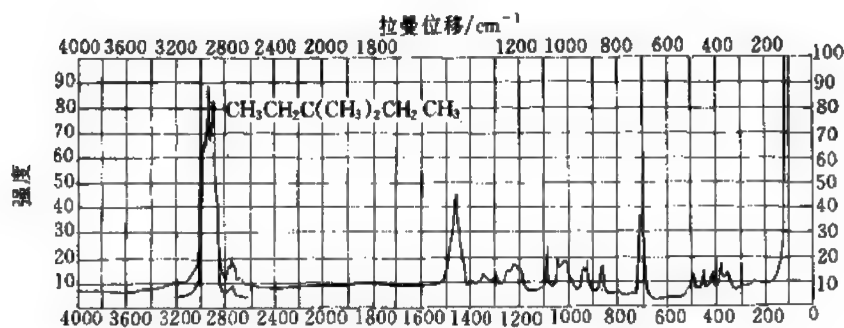


图 21-38 3,3-二甲基戊烷

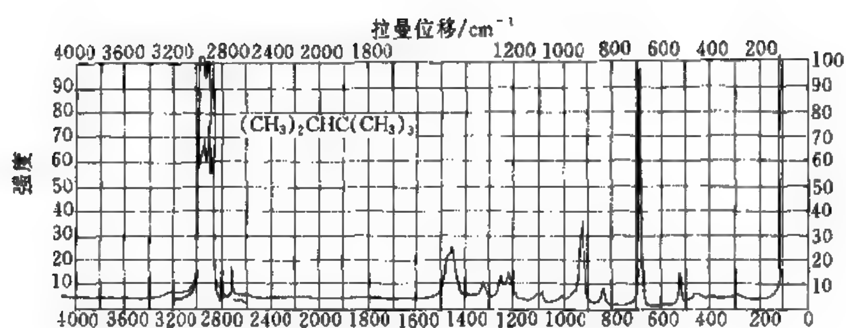


图 21-39 2,2,3-三甲基丁烷

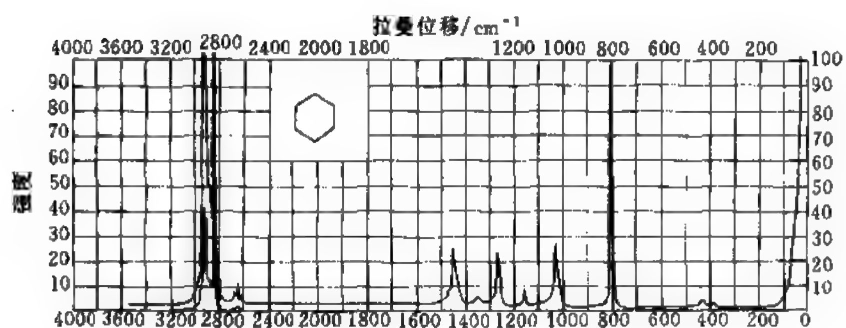


图 21-40 环己烷

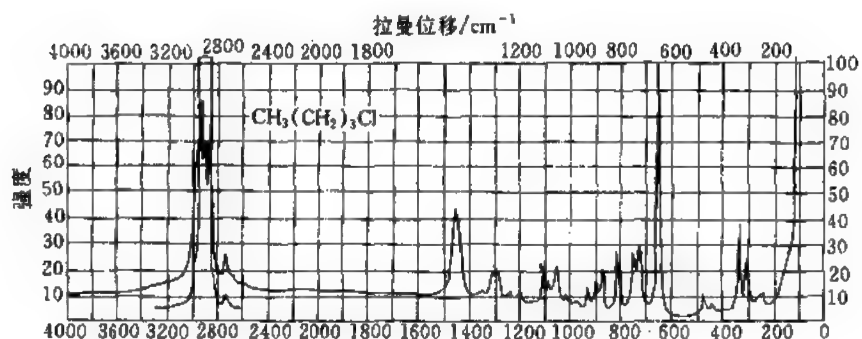


图 21-41 1-氯丁烷

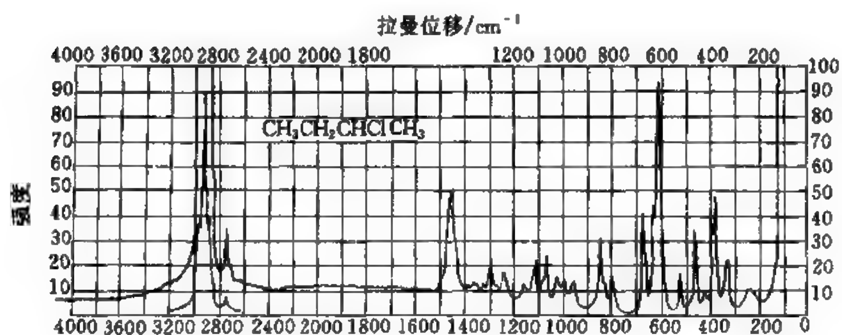


图 21-42 2-氯丁烷

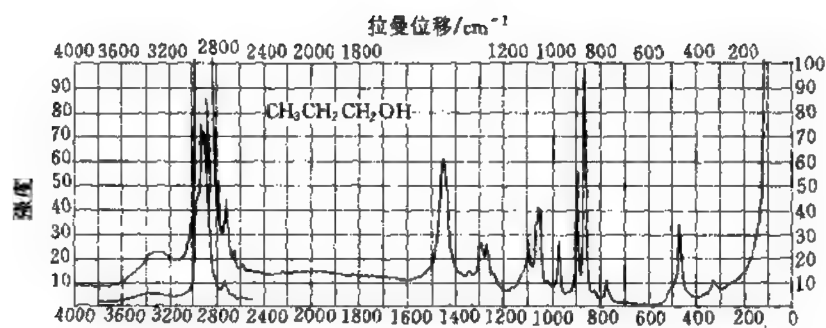


图 21-43　1-丙醇

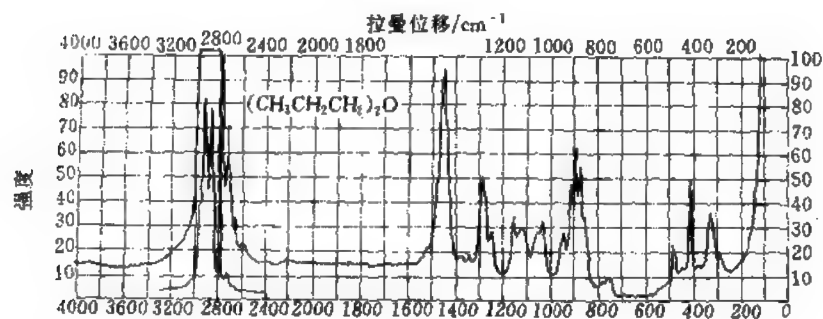


图 21-44　二丙醚

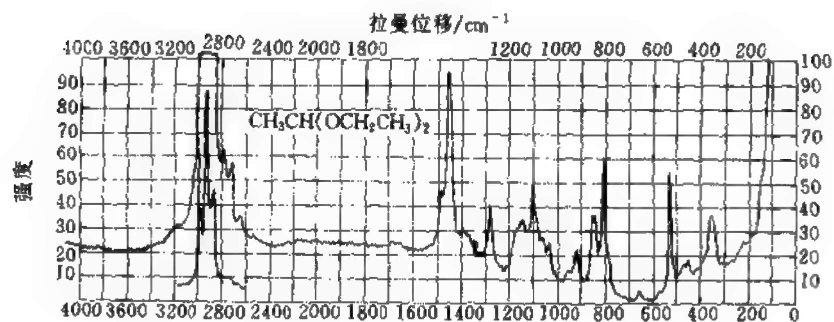


图 21-45　乙缩醛

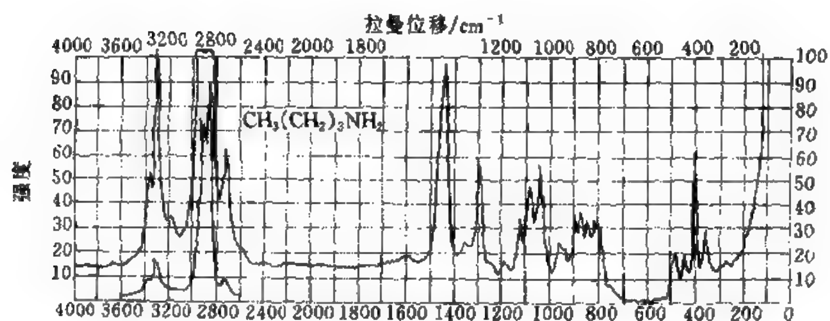


图 21-46　正丁胺

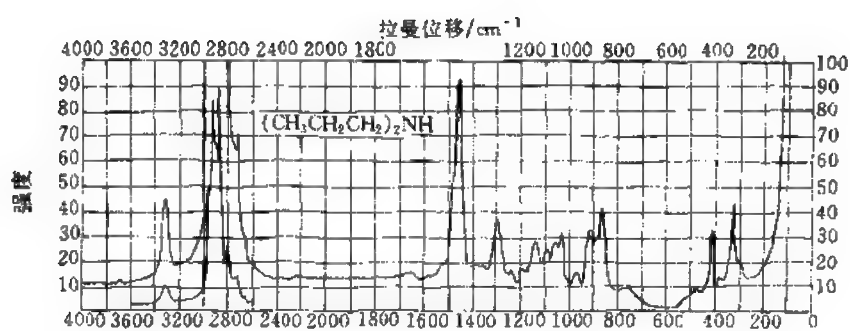


图 21-47　二丙胺

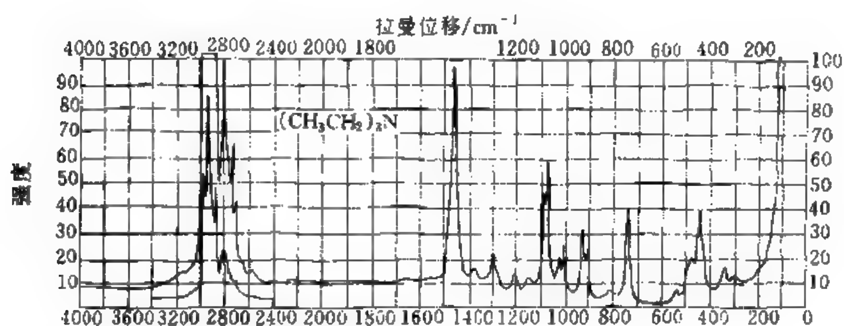


图 21-48　三乙胺

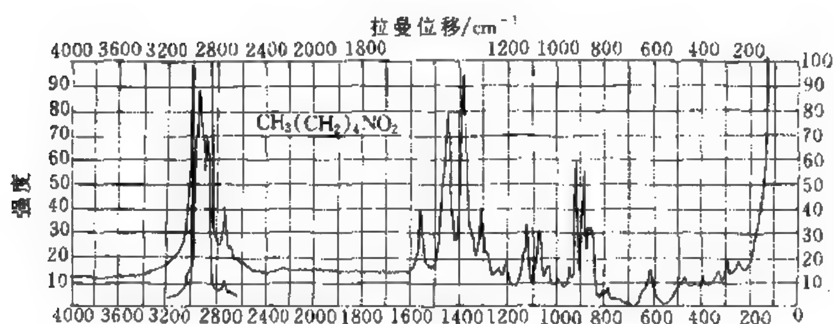


图 21-49　1-硝基戊烷

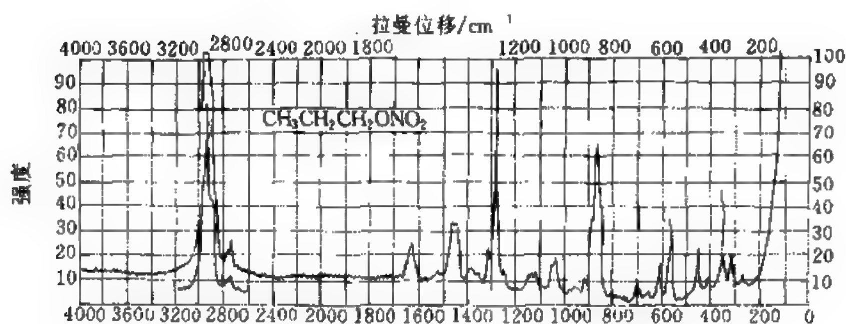


图 21-50　硝基正丙酯

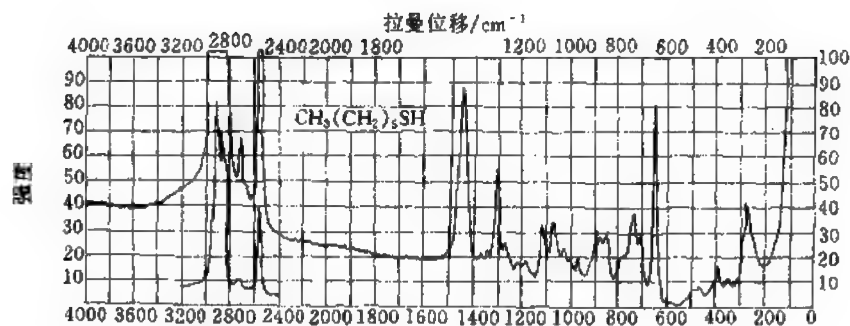


图 21-51　1-己硫醇

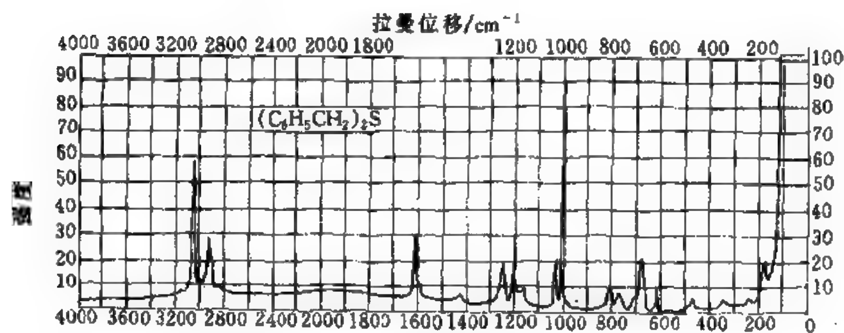


图 21-52　二苄硫醚

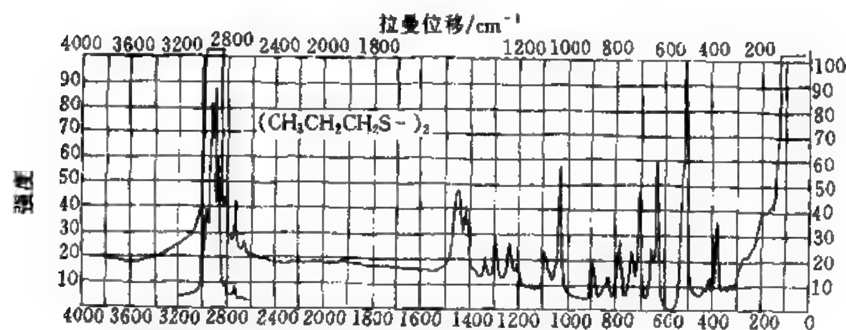


图 21-53　二丙基二硫化物

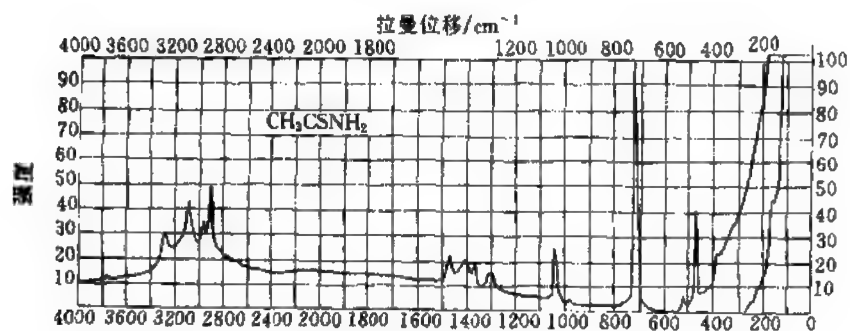


图 21-54　硫代乙酰胺

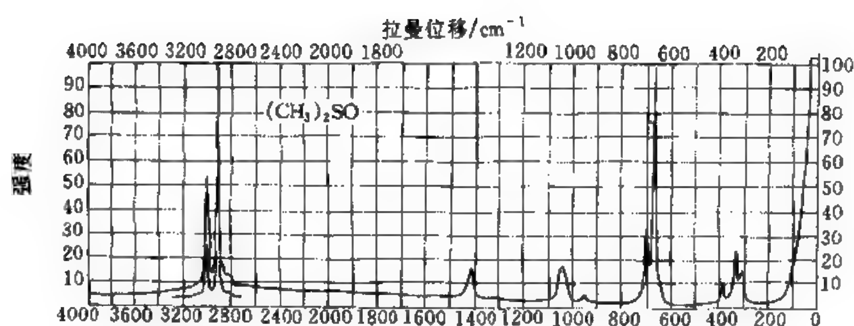


图 21-55　二甲基亚砜

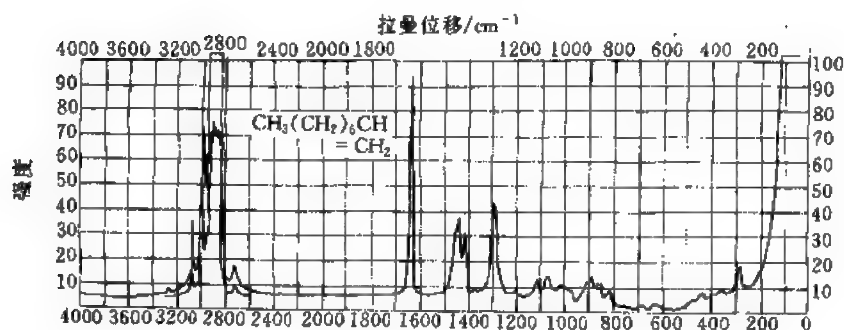


图 21-56　1-辛烯

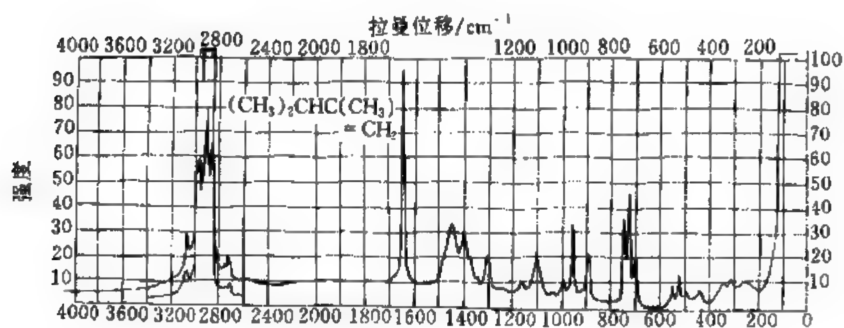


图 21-57　2,3-二甲基-1-丁烯

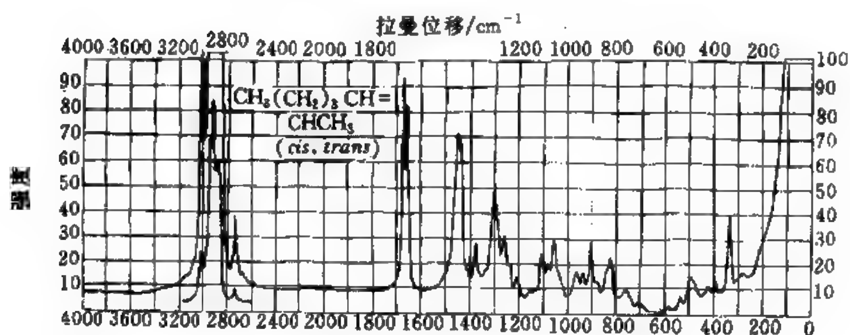


图 21-58　2-庚烯(顺式和反式)

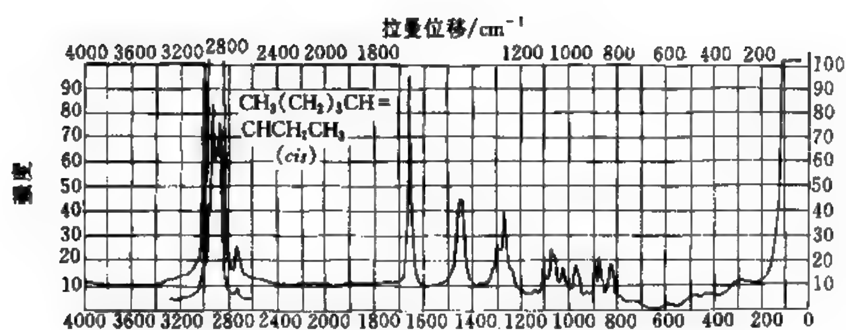


图 21-59　顺式-3-辛烯

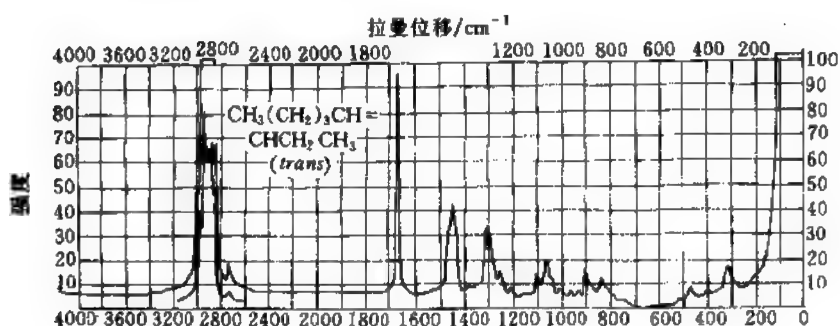


图 21-60　反式-3-辛烯

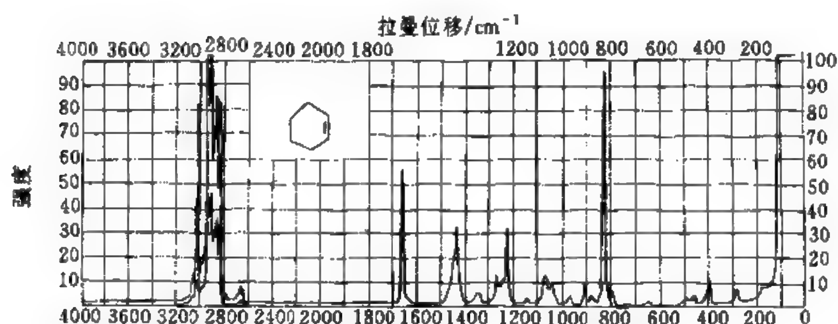


图 21-61　环己烯

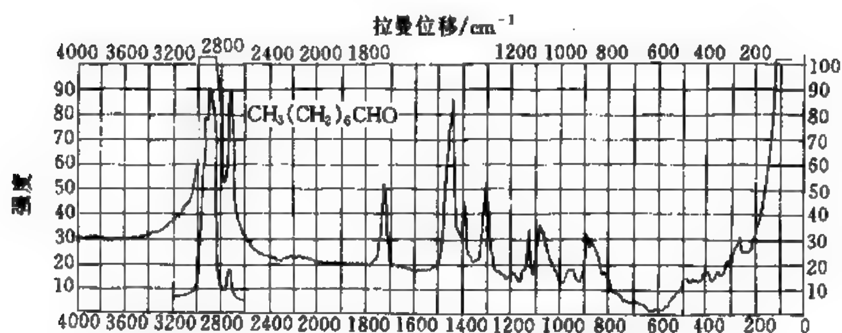


图 21-62　辛醛

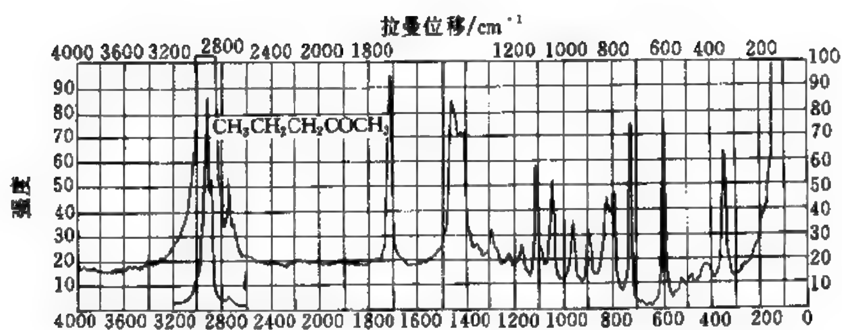


图 21-63　2-戊酮

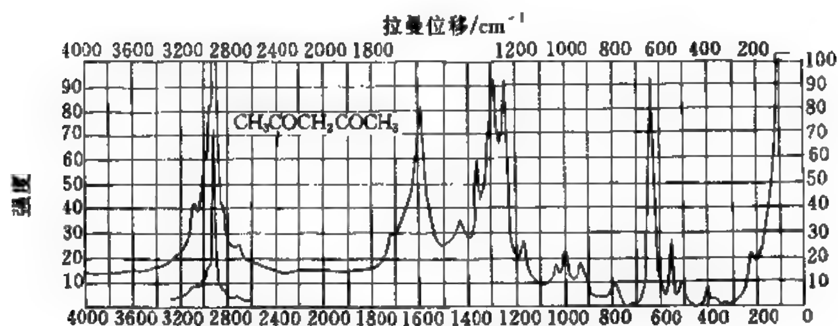


图 21-64　2,4-戊二酮

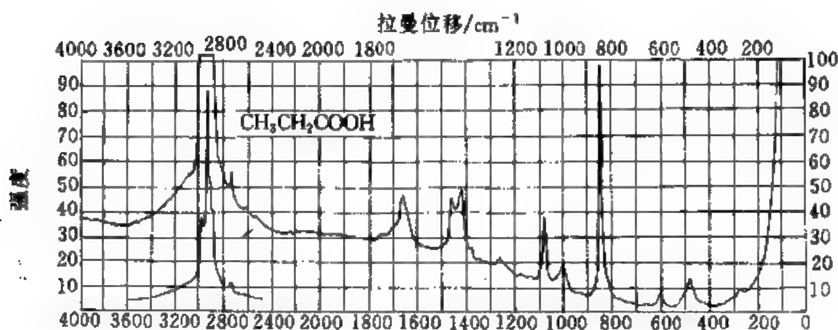


图 21-65　丙酸

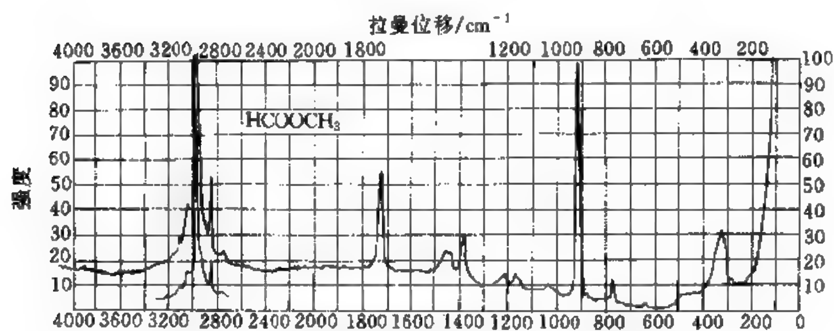


图 21-56　甲酸甲酯

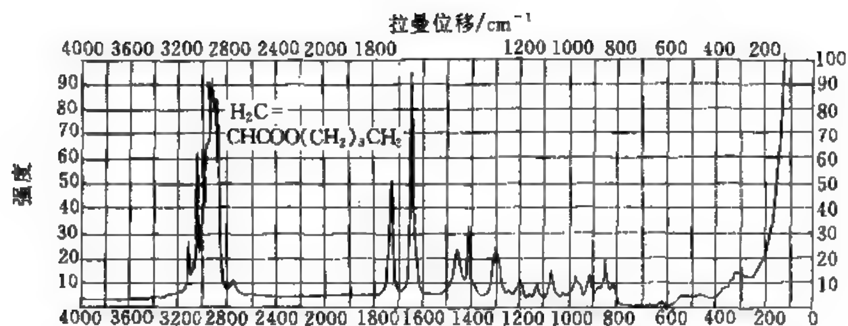


图 21-67　丙烯酸正丁酯

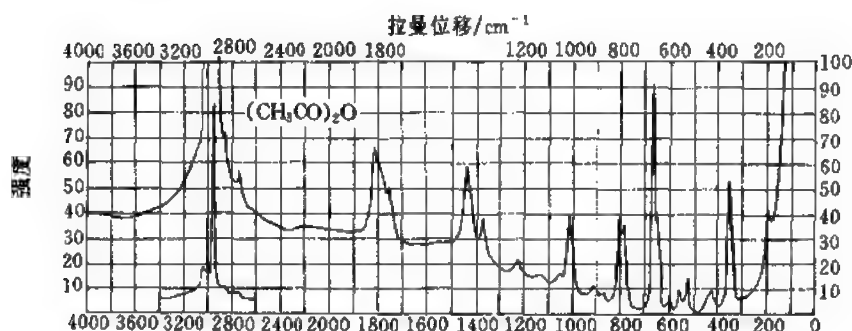


图 21-68　乙酐

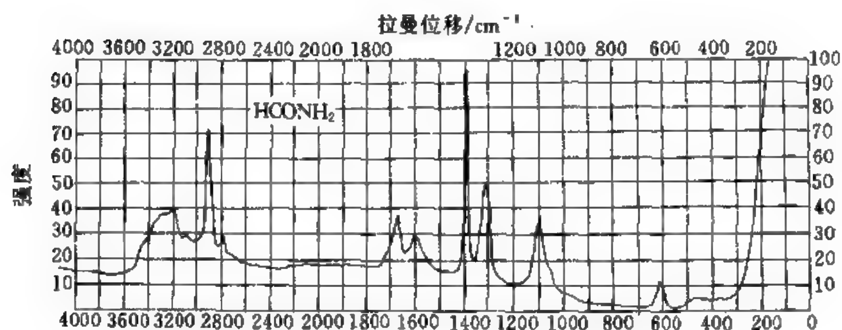


图 21-69　甲酰胺

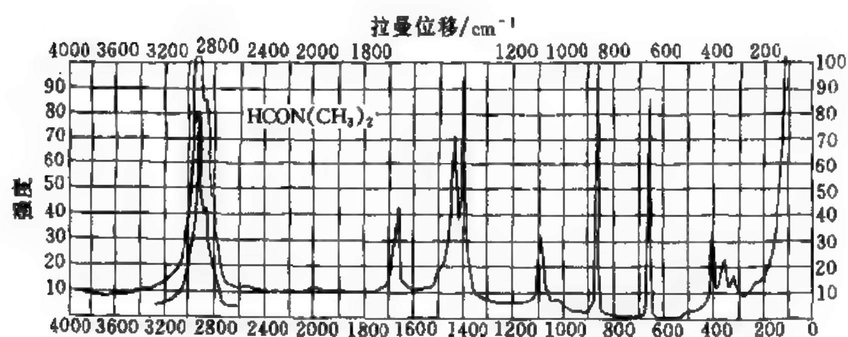


图 21-70　N,N-二甲基甲酰胺

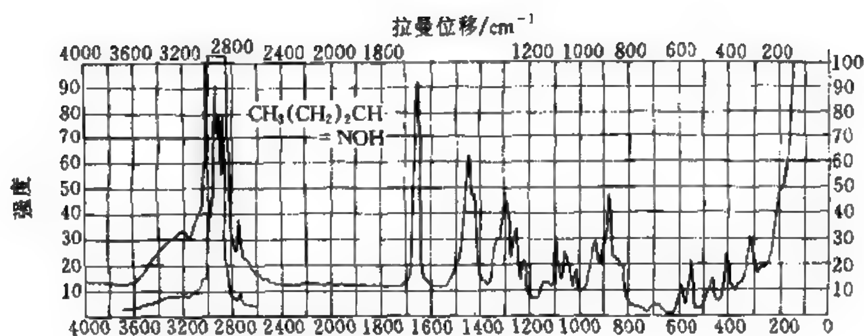


图 21-71　丁醛肟

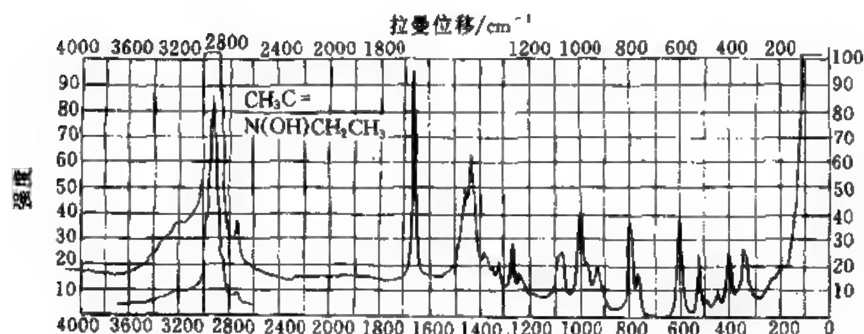


图 21-72　丁酮肟

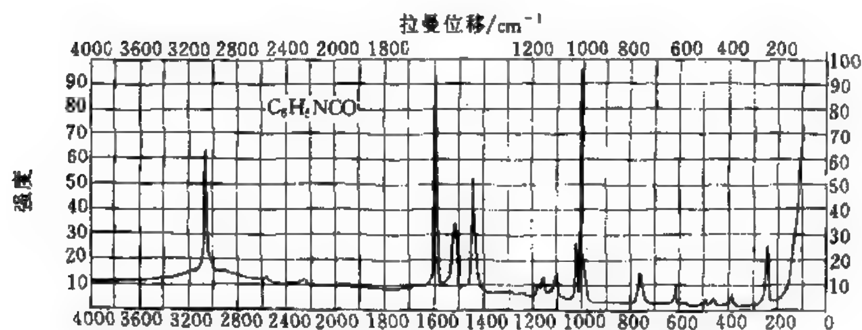


图 21-73　异氰酸苯酯

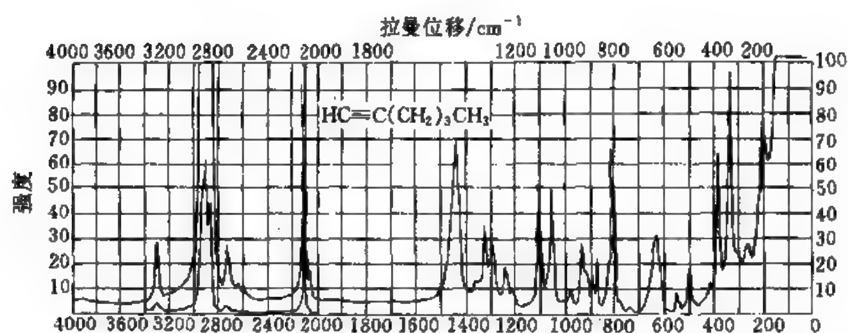


图 21-74　1-己炔

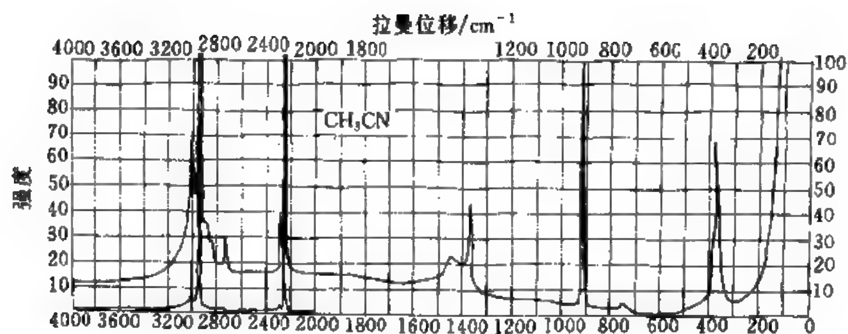


图 21-75　乙腈

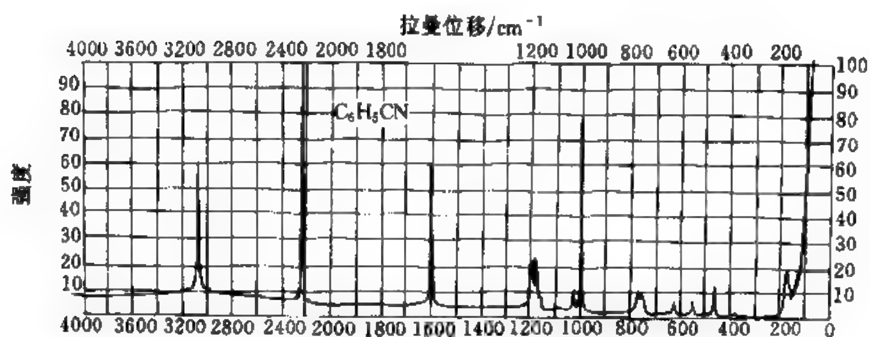


图 21-76　苯甲腈

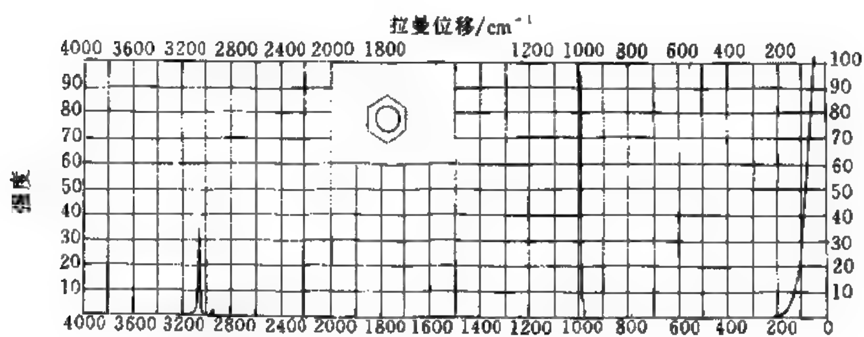


图 21-77　苯

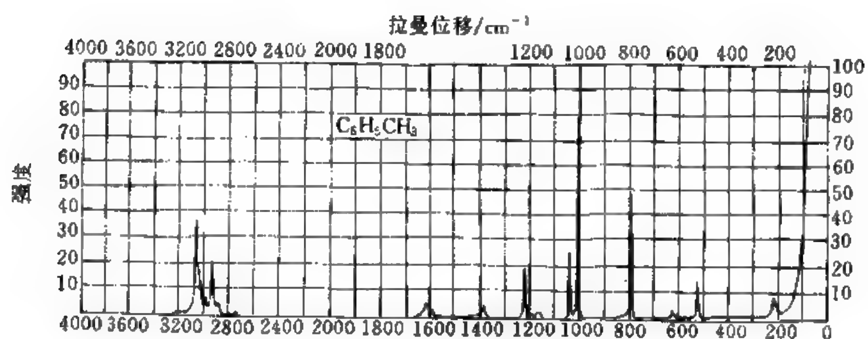


图 21-78　甲苯

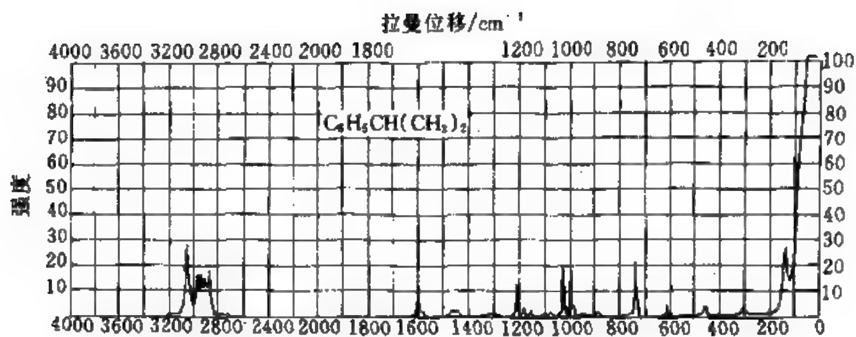


图 21-79 异丙苯

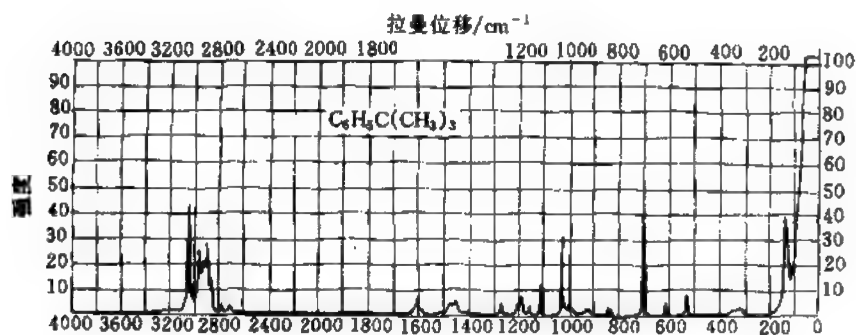


图 21-80 叔丁苯

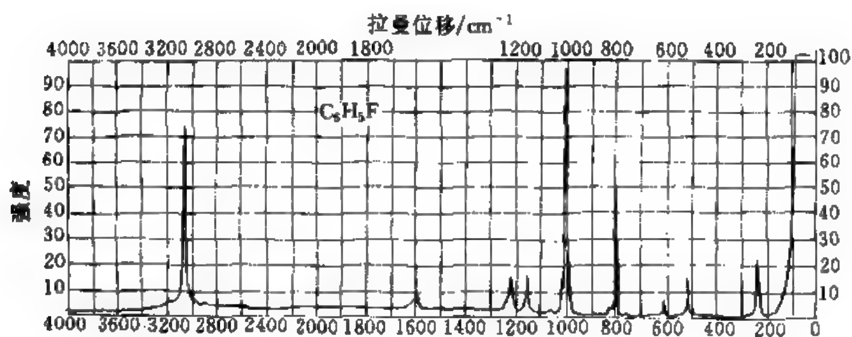


图 21-81 氟代苯

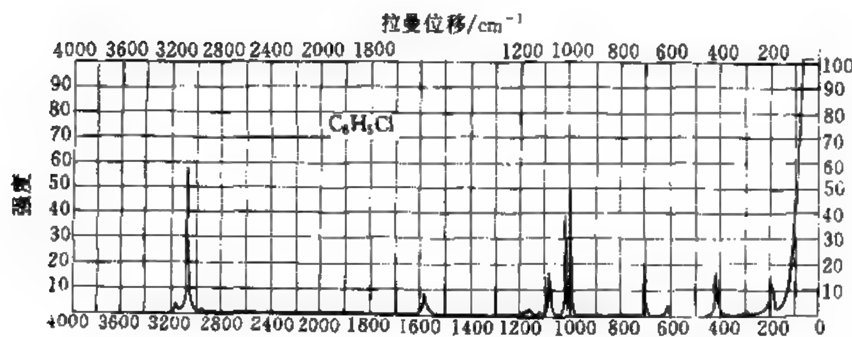


图 21-82 氯代苯

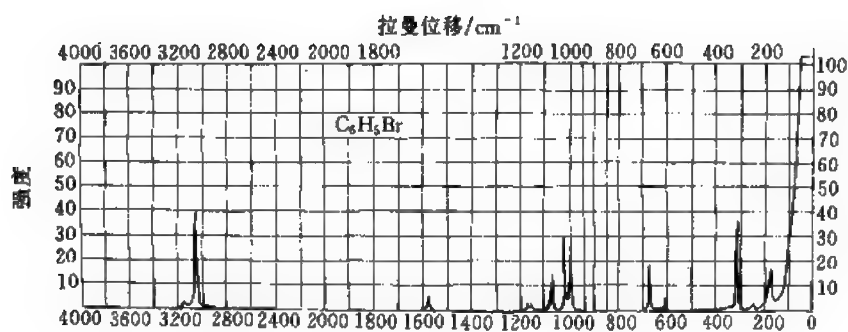


图 21-83 溴代苯

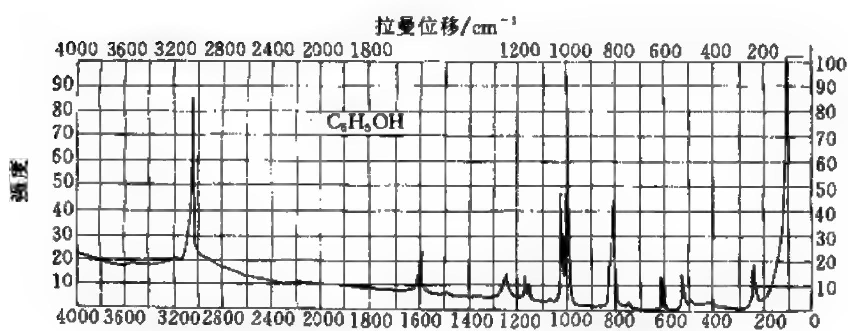


图 21-84 苯酚

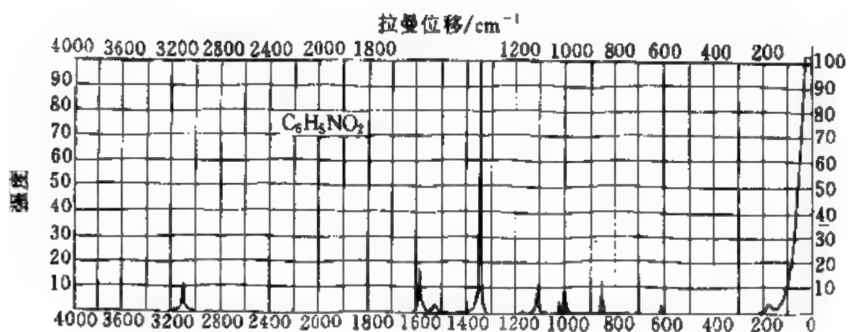


图 21-85 硝基苯

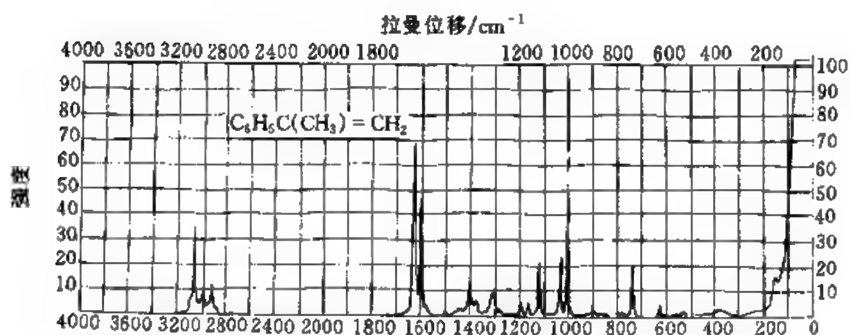


图 21-86 α-甲基苯乙烯

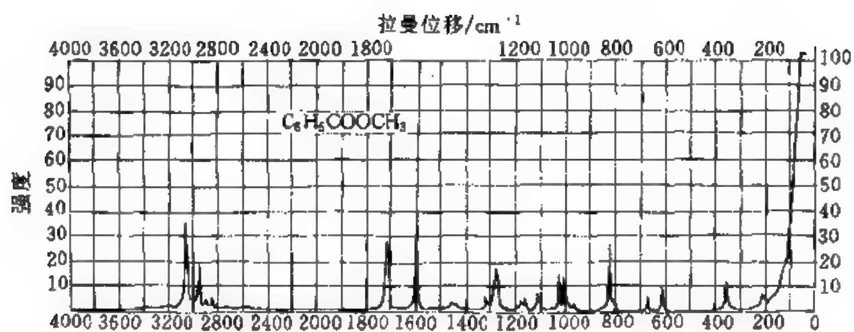


图 21-87 苯甲酸甲酯

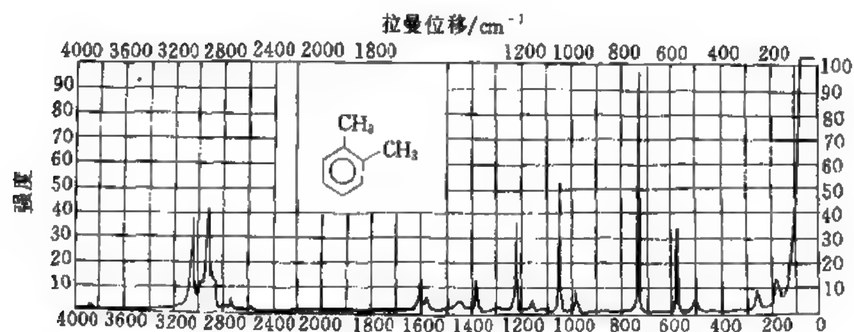


图 21-88 1,2-二甲苯

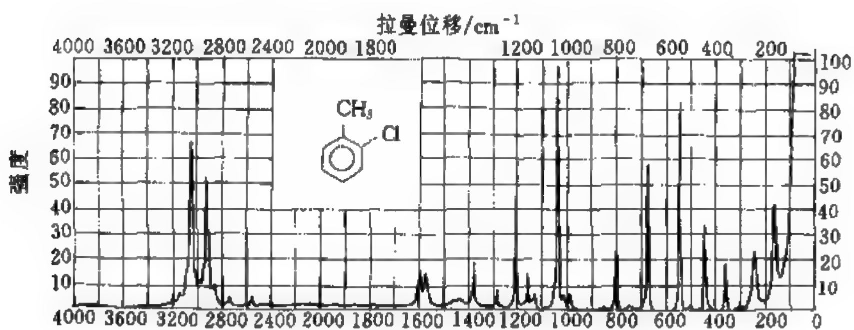


图 21-89 1-氯-2-甲苯

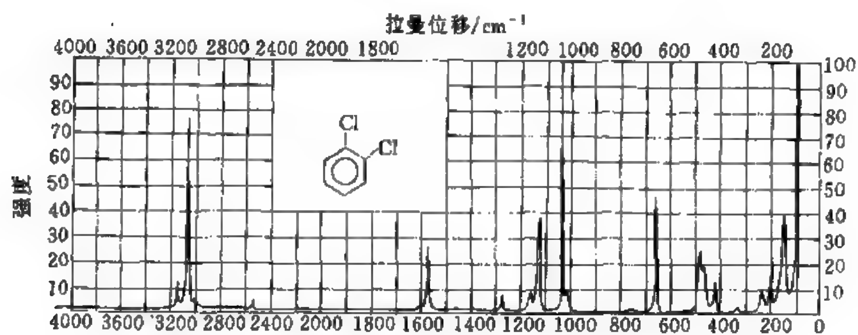


图 21-90 1,2-二氯苯

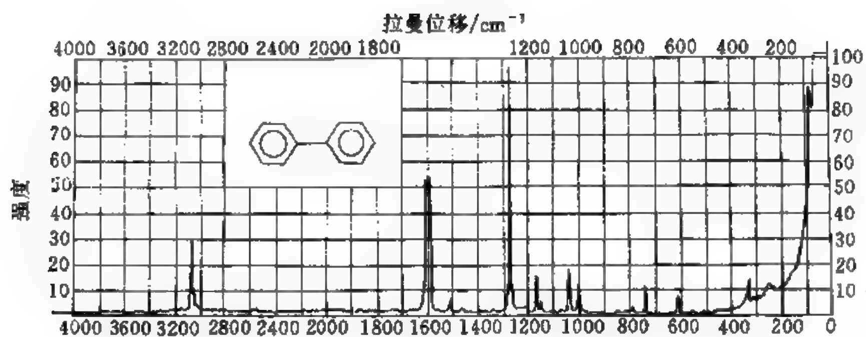


图 21-91　联苯

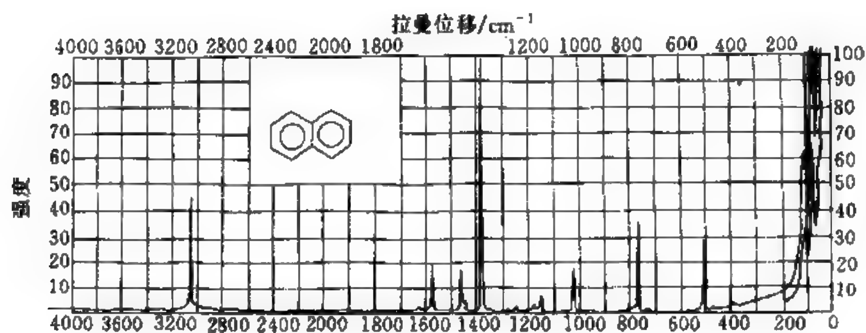


图 21-92　萘

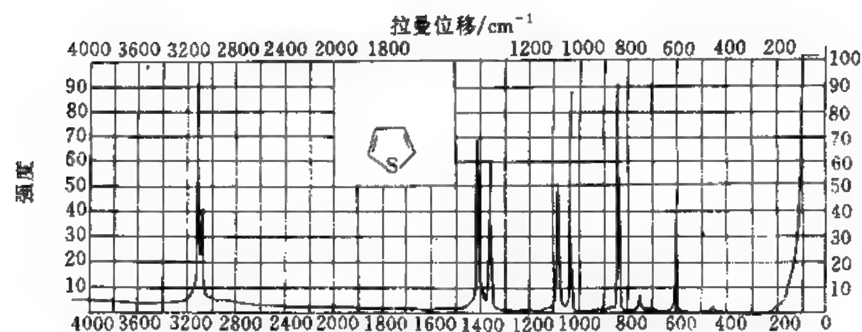


图 21-93　噻吩

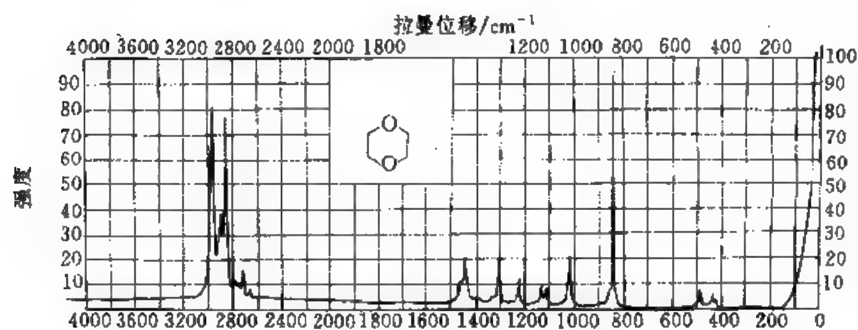


图 21-94　1,4-二氧六环

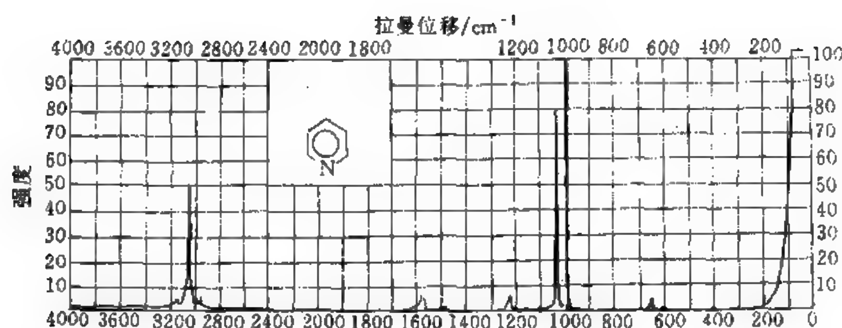


图 21-95　吡啶

参 考 文 献

1　Smekal A. Naturwiss，1923；11：873
2　Raman C V. Nature，1928；121：501，619，721；Indian J. phys.，1928；2：287
3　Hirschfeld T B. Applied Spectroscopy，1986；40：133
4　Colthup N B，Daly L H，et al. Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy，3rd ed，New York：Academic Press，1990
5　潘家来编．激光拉曼光谱在有机化学上的应用．北京：化学工业出版社，1986
6　吴瑾光主编．近代傅里叶变换红外光谱技术及应用（上卷）．北京：科学技术文献出版社，1994
7　科顿 FA 著．群论在化学中的应用．北京：科学出版社，1984
8　王宗明，何欣翔等编．实用红外光谱学．北京：石油化学工业出版社，1978
9　BaraNska H et al. Laser Raman Spectrometry analytical applications. Ellis Horwood Limited，1987
10　Skoog D A，Leary JJ. Principles of Instrumental Analysis (Fourth Edition)，Saunders College Publishing，1992
11　许振华．光谱学与光谱分析，1993；13(1)：83
12　朱贵云，杨景和编著．激光光谱分析法．北京：科学出版社，1989
13　Craig N C，Levin I W. Appl. Spectrosc.，1979；33 (5)：475
14　Julien C，Hirlimann C. J. Raman Spectrosc.，1980；9(1)：62
15　Kim S B，Hammaker R M，Fateley W G. Appl. Spectrosc.，1986；40(3)：412
16　Savio R，Pigeon-Gosselin M. Canadian J. Spectrosc.，1983；28(4)：133
17　Robinson J W. Practical Handbook of spectroscopy.，1991
18　王阿莲，郁鉴源等．光谱学与光谱分析，1993；13(5)：37
19　江天麟．光谱学与光谱分析，1984；4(3)：7
20　程微微，唐廷吉．分析化学，1992；20(12)：1458
21　朱自莹，顾仁敖等．光谱学与光谱分析，1993；13(1)：47
22　周光明，戴荟生，曾云鹗．分析测试学报，1996；15(6)：85
23　多林希 F R，佛特利 W G 等，朱自莹译．有机化合物的特征拉曼频率，中国化学会．1980
24　Lin-Vien D，Grasselli J G，et al. The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecnles. Acdemic Press. Ine

第六篇　荧光、磷光及化学发光分析法

第二十二章　荧光分析法基本原理、荧光试剂与仪器

第一节　荧光分析法基本原理[1~7]

一、荧光的产生机理

荧光的产生过程包括分子的激发及去活化两个阶段。

(一) 激发

当物质吸收了一定频率的辐射能之后，分子中的电子由原来的基态跃迁至激发态的不同振动能级，这一过程称为激发。大多数分子在室温下处于基态的最低振动能级。通常分子里的价电子数目是偶数，若一半的自旋方向正好和另一半的自旋方向相反，价电子自旋量子数的总和为零，即 $S=0$，自旋的多重态 $M=2S+1=1$，这类分子我们称它处于单重态，用 S 表示。个别物质的分子正向自旋和反向自旋电子数不相等，两者相差为 2，$S=1$，$M=3$，我们称这类分子处于三重态，用 T 表示。基态分子和激发态分子都有单重态和三重态两类。单重态的电子基态 (S_0) 的分子被激发时，容易跃迁到单重态的电子激发态 (S_1，S_2，……)，而不容易跃迁到三重态的电子激发态 (T_1，T_2，……)，后一种为电子自旋不允许的禁止跃迁。同样，$T_0 \to T_1$ 或 $T_1 \to T_0$ 容易，$T_1 \to S_0$ 或 $S_1 \to T_0$ 难。荧光（或磷光）所涉及的分子，其基态都处于单重态，具有最低的电子能。图 22-1 表明处于单重态的电子基态和电子激发态分子与处于三重态的电子激发态的差别。

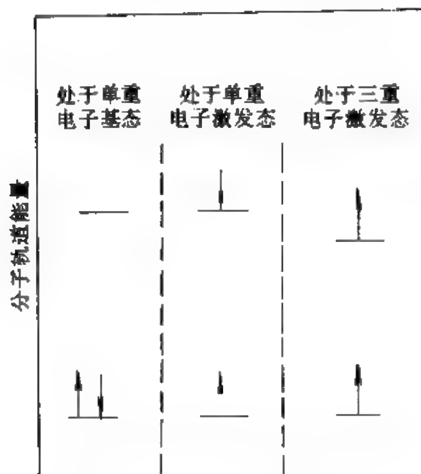


图 22-1　基态、激发单重态和三重态中电子分布

(二) 激发态分子的去活化

激发态分子所处的是不稳定的状态，它可以通过辐射跃迁和非辐射跃迁等分子内的去活化过程失去多余的能量而返回基态。

1. 辐射跃迁过程

辐射跃迁去活化过程发生光子的发射。原则上每一个激发态都可以通过发射光子退活到基态。在实际中，几乎只观察到分子从最低激发态的发射，而极少从较高的激发态发射。由第一电子激发单重态所产生的辐射跃迁而伴随的发光现象称为荧光；而由最低的电子激发三重态所产生的辐射跃迁，其发光现象称为磷光。磷光的发射必须改变自旋状态，因此这一发射过程的速度比荧光慢得多。

2. 非辐射跃迁过程

在无发光伴随下从最低激发态（S_1 或 T_1）到基态 S_0 的去激过程叫非辐射去活化。非辐射跃迁包括：内转化（Internal Conversion，IC），指相同多重态的两个电子态间的非辐射跃迁（$S_1 \rightsquigarrow S_0$，$T_2 \rightsquigarrow T_1$）；系统间交叉或称体系间窜跃（Intersystem Crossing，ISC），指不同多重态的两个电子态间的非辐射跃迁（$S_1 \rightsquigarrow T_1$，$T_1 \rightsquigarrow S_0$）；碰撞振动弛豫（VR）等等。典型有机分子的重要辐射过程和非辐射的弛豫过程见图 22-2。

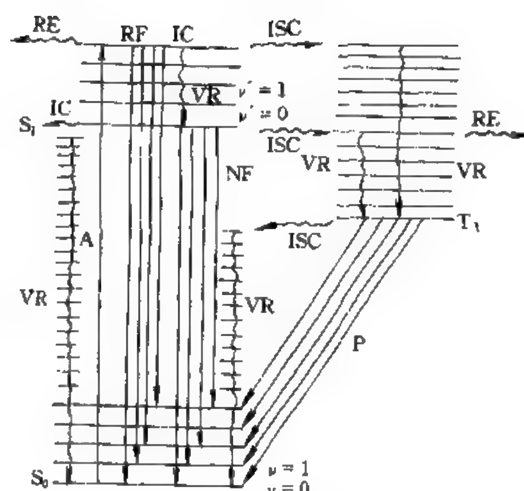


图 22-2 典型有机分子的重要辐射过程（用实线表示）和非辐射弛豫过程（用波纹线表示）

ν，ν′—振动能级；A—吸收；RF—共振荧光；NF—普通荧光；P—磷光；VR—碰撞振动弛豫；IC—内转换；ISC—系统间交叉；RE—化学反应

较高振动能级上的分子很快地（约 10^{-12}s～10^{-14}s）发生振动弛豫，落到该电子的最低振动能级（$V=0$）。激发单重态间的内转化速度很快，更高激发单重态 S_2 以上的寿命很短（10^{-11}s～10^{-13}s），在辐射跃迁发生之前，便内转化及振动弛豫落到 S_1 电子态的最低振动能级。所以观察到的荧光现象，通常情况下是发生自 S_1 态的最低振动能级的辐射跃迁。发生于单重态三重态之间的系统间交叉属自旋禁止过程，速度常数较小，所以液态溶液中很少观察到磷光。

二、荧光物质的激发光谱和发射光谱

（一）荧光激发光谱

荧光物质的激发光谱是指不同激发波长的辐射引起物质发射某一波长荧光的相对效率。也就是，固定发射波长，改变激发波长，所得的荧光强度与激发波长的关系曲线为激发光谱。理论上最大激发波长与最大吸收波长是一致的，由激发光谱可选择最佳激发波长。

由于荧光测量仪器的特性，某种化合物的荧光激发光谱形状与它的吸收光谱形状不相同；只有对仪器因素进行校正之后获得的校正激发光谱才与吸收光谱非常接近（见图 22-3）。

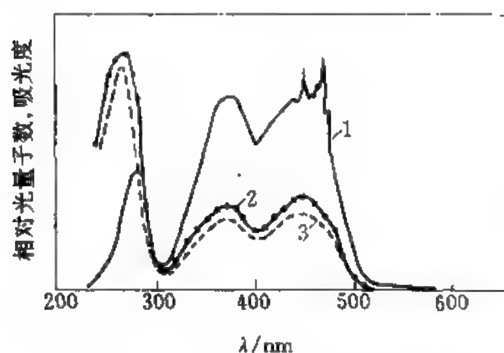


图 22-3 维生素 B_2 激发光谱的校正

1—未校正的激发光谱；2—校正的激发光谱；3—吸收光谱

（二）荧光发射光谱

使激发光的波长和强度保持不变，让荧光物质所产生的荧光通过发射单色器后照射于检测器上，扫描发射单色器并检测各种波长下相应的荧光强度，然后记录荧光强度对发射波长的关系曲线，所得到的谱图即称为荧光发射光谱（又称荧光光谱）。荧光发射光谱可鉴别荧光物质，并作为荧光测定时选择适当的测定波长或滤光片的依据。同样，荧光发射光谱也需要校正。

荧光光谱一般有以下几个特征：

(1) 斯托克斯位移　在溶液荧光光谱中，所观察到的荧光的波长总是大于激发光的波长，这种波长移动的现象称为斯托克斯位移（见图 22-4）。

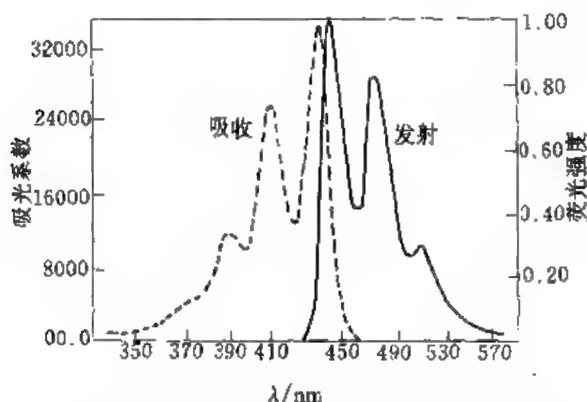


图 22-4　菲的苯溶液的吸收光谱和荧光发射光谱

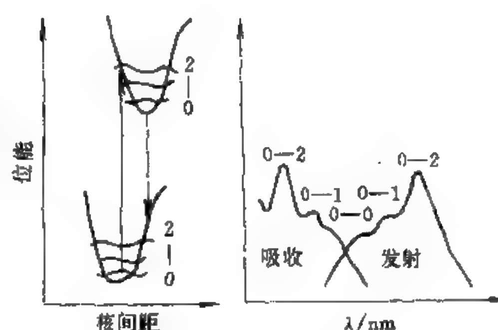


图 22-5　镜像对称规则

(2) 荧光发射光谱的形状　荧光发射光谱的形状与激发波长无关。

(3) 与吸收光谱的镜像关系　吸收光谱与荧光光谱必需以适当的单位加以表示，两者才有严格的镜像关系（见图 22-4）。这种镜像关系可用 Frank-Condon 原理解释，电子跃迁速率非常快，以致跃迁过程中核的相对位置近似不变。电子的跃迁可以用垂直线表示，假如在吸收光谱中 0～2 振动带的跃迁几率最大，则荧光光谱中，其相反跃迁的几率也应该最大（见图 22-5）。

三、溶液的荧光强度与浓度的关系

（一）荧光的寿命

荧光分子的平均寿命（τ）定义：当不存在进一步的激发时，处于激发态的分子数目衰减到初始值的 1/e 所经历的时间，用下式表示

$$\tau=1/(k_f+\Sigma K) \tag{22-1}$$

式中，k_f 为荧光发射的速率常数；ΣK 为各种非辐射去活化过程的速率常数总和。荧光强度的衰变一般遵从如下速率方程式

$$\ln F_0-\ln F_t=-t/\tau \tag{22-2}$$

式中 F_0 和 F_t 分别表示 $t=0$ 和 $t=t$ 时的荧光强度。作 $\ln F_t-t$ 的关系曲线，从该直线的斜率求出荧光寿命 τ。

没有非辐射去活化过程存在时的荧光寿命为内在的寿命，用 τ_0 表示

$$\tau_0=1/k_f \tag{22-3}$$

一个近似的经验规则是

$$\tau_0=10^{-4}/\varepsilon_{max} \tag{22-4}$$

式中 ε_{max} 为最大吸收波长下的摩尔吸光系数。

（二）荧光量子产率

荧光量子产率（Φ_f）的定义：荧光物质吸光后所发射的荧光的光子数与所吸收的激发光的光子数之比值，即

$$\Phi_f=\frac{\text{发射的光量子数}}{\text{吸收的光量子数}} \tag{22-5}$$

$$\Phi_f = k_f/(k_f+\Sigma K) \tag{22-6}$$

现代最常用的测量方法是相对测量法得到相对荧光量子产率值。在同一设备和激发光强度下测定已知量子产率标准溶液（以 s 脚注），和另一未知量子产率溶液（以 x 脚注）的校正荧光发射光谱面积 D 时，有以下的关系：

$$\Phi_{f_x} = \frac{n_x^2}{n_s^2} \cdot \frac{A_s \cdot D_x}{A_x \cdot D_s} \cdot \Phi_{f_s} \quad (A \leqslant 0.05) \tag{22-7}$$

式中，A 为吸光度；n 为溶液折射率；D 为校正荧光发射光谱积分面积。有分析应用价值的荧光化合物，荧光量子产率的数值常处于 0.1～1 之间。

从式(22-1)，式(22-3)和式(22-6)推导出荧光量子产率与荧光寿命之间的关系为

$$\Phi_f = \tau/\tau_0 \tag{22-8}$$

（三）荧光强度与溶液浓度的关系

对于很稀的溶液，荧光强度与溶液中荧光物质的浓度的关系为

$$F = 2.303 I_0 \varepsilon b c \Phi_f \qquad (\varepsilon bc \leqslant 0.05) \tag{22-9}$$

式中，I_0 为入射光强度；ε 为摩尔吸光系数；c 为溶液中荧光物质的浓度；b 为液池厚度。荧光强度和溶液的浓度呈线性关系。

四、荧光与结构的关系

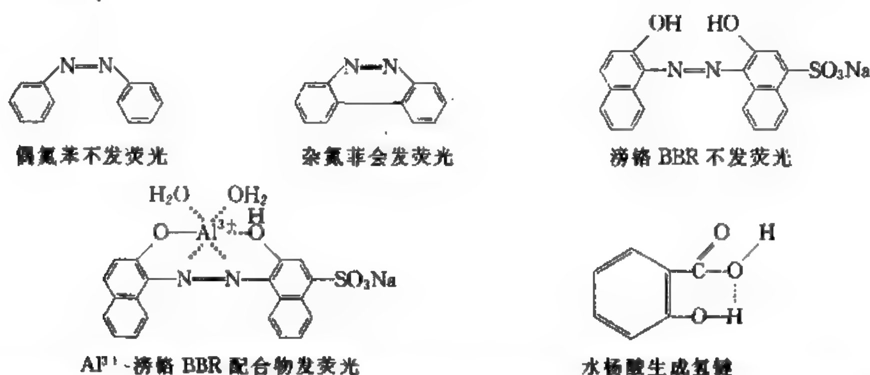
在荧光分析中，分析对象本身必须具有荧光特性，或者使其与相应的荧光试剂反应生成具有荧光特征的物质。分子的荧光性主要取决于它自身的能量状态，即该分子的化学结构。荧光强度与分子结构关系一般具有如下普遍规律。

1. 具有共轭 π 键的化合物

化合物共轭体系越大，能量越低，离域 π 电子越容易激发，荧光越易产生。大部分荧光物质具有芳环或杂环，芳环越大，其荧光峰越移向长波方向，荧光强度也越强。

2. 具有刚性平面结构的化合物

荧光效率高的荧光体，其分子多是平面构型且具有一定的刚性，例如偶氮苯不发荧光，而杂氮菲会发荧光。



偶氮苯不发荧光　杂氮菲会发荧光　滂铬 BBR 不发荧光

Al^{3+}-滂铬 BBR 配合物发荧光　水杨酸生成氢键

有机配位剂与金属离子组成配合物或取代基之间形成氢键，加强了分子的刚性，使荧光强度增强。

3. 取代基的影响

(1) 给电子取代基　当化合物中含有—NH_2、—NHR、—NR_2、—OH、—OR、—CN 等给电子基团时，这些基团上的 n 电子可通过共轭效应（+E）向芳环离域，使共轭体系中电子

云密度增大，分子基态激发能降低，故能增强分子的荧光。但要注意的是，这类基团的 n 电子容易与极性溶剂生成氢键，荧光强度相应变弱。

(2) 吸电子取代基　当化合物中含有 $-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-$ 、 $-\overset{\overset{\displaystyle O}{\diagup\!\!\diagup}}{C}-H$ 、 $-COOH$ 、 $-NO_2$ 和重氮类等基团时，由于吸电子基的诱导效应（−I），使共轭体系中 π 电子云的密度降低，削弱了分子的荧光。这类基团也含有 n 电子，对溶剂的极性和酸碱度敏感。

(3) 取代基的位置　邻位及对位取代者对荧光影响较大，间位取代者影响不大，两种性质不同的取代基共存时，其中一个取代基起主导作用。

(4) 重原子效应　芳烃取代上卤素（Cl、Br 和 I）等其他的重原子之后，分子内的共轭效应（+E）小于诱导效应（−I），使共轭体系的电子云密度下降。分子荧光强度随重原子的原子量增加而减弱，而磷光通常相应地增强，这种效应称为重原子效应。因为重原子的存在，使得荧光体中电子自旋-轨道偶合作用加强，$S_1 \rightsquigarrow T_1$ 的系间交叉增加，导致荧光强度减弱，磷光强度增强。

4. 铀和稀土元素的盐类

参加吸光的是 4f 和 5f 内层电子，与外部没有能量交换，无论固相还是液相都很容易发出 4f 和 5f 电子跃迁所特有的荧光。

5. 配位化合物的荧光

金属离子与有机配位体形成配位化合物的发光能力与金属离子以及有机配位体的结构有很大关系。

(1) 二元配合物　金属离子主要有两种类型。第一类金属离子的外电子层具有与惰性气体相同的结构，为反磁性离子，这种金属离子与含有芳基的有机配位体形成配合物时一般会发较强的荧光。配合物的荧光强度随金属离子的原子量增加而减弱（也称重原子效应），吸收峰和发射峰也相应向长波长方向移动。金属离子相当于一惰性原子，与有机配位体的不同部位形成一附加环，同时加强配位体的刚性平面结构。这类配合物由配位体 L 吸光和发光，称 L^*—L 发光。第二类金属离子具有惰性气体的外层电子结构，其次外层含有未充满电子的 f 层，金属离子会产生 $f^* \rightarrow f$ 发光跃迁。激发的有机配位体的能量可能转移给金属离子 M，产生金属离子激发态 M^*，由激发态金属离子 M^* 返回基态，发出特征的线状荧光，称 M^*—M 发光。其荧光强度比该金属纯无机离子的荧光强得多，金属离子得到敏化，部分稀土元素属于这类。同一稀土元素与不同的有机配位体形成的配合物，其发光类型可以是 L^*—L 型，也可以是 M^*—M 型。还有某些离子 Co(Ⅲ)，Ni(Ⅰ)等的电子处于低自旋的 d^6 构型，反磁性，形成配合物的发光属于 π^*—d 或 d^*—d 型。

(2) 三元配合物　分为两类：第一类是离子缔合三元配合物，又包括两种。第一种形成过程是金属离子先与阴离子配位体生成二元配阴离子，例如 $AuCl_4^-$，$TlCl_4^-$ 等，再与阳离子荧光染料（主要为罗丹明类染料）生成三元缔合物。另一种是金属离子先与碱性配位体生成配阳离子，而后与阴离子染料生成三元配合物。作为这种碱性配位体的有吡啶、邻菲绕啉等。第二类是中心离子与一配位体形成二元配合物而尚有能力与另一配位体结合，形成三元配合物。三元配合物的发光行为与上述的二元配合物相似，即可分为 L^*—L 型发光和 M^*—M 型发光。可是在某些情况下，三元配合物可大大提高荧光分析法的灵敏度和选择性。目前有很多元素采用三元配合物的荧光分析。

五、环境因素对荧光光强度的影响

虽然分子的荧光性取决于分子的化学结构，但溶液中环境因素对分子荧光能产生强烈的影响。

1. 溶剂的影响

一般情况下，若因极性溶剂引起红移，荧光来自 $\pi-\pi^*$ 激发单重态，若引起紫移则表明荧光来自 $n-\pi^*$ 激发态。有人认为溶剂对于荧光强度的影响主要决定于溶剂的分子结构，而不在于溶剂的极性。溶质、溶剂分子间的相互作用，即偶极子间的静电作用、氢键、电荷移动等因素改变了荧光的量子产率，要对溶剂的影响做出恰当解释是不容易的。

2. 温度的影响

在一般情况下，随着荧光物质温度的升高而荧光强度降低。其原因在于高温下分子碰撞失去能量以及易于发生内部转化和系间交叉，可是也有例外。在荧光测定时需要使试样保持恒温。

3. pH 值

一般情况下，溶液的 pH 值对荧光性有机化合物和荧光性螯合物的荧光光谱以及荧光强度具有很大影响，进行定量分析时必须选择最佳 pH 范围。

4. 外重原子效应

在重原子溶剂中，由于重原子与荧光性分子形成弱的电荷转移型配位化合物，加大了系统间交叉（$S_1 \rightsquigarrow T_1$）。纯粹的单重态（S）与纯粹的三重态（T）之间理应不发生跃迁。但重原子的高核电荷引起溶质分子轨道角动量与自旋角动量的相互作用（耦合），使 $S_0 \rightsquigarrow S_1$ 吸收跃迁，$S_1 \rightsquigarrow T_1$ 的系统间交叉，磷光以及 $T_1 \rightsquigarrow S_0$ 系间交叉等过程的几率增大，荧光减弱，磷光的量子产率增强。

5. 氢键的影响

荧光物质和溶剂或其他溶质之间所发生的氢键作用，对于荧光物质的荧光光谱和荧光强度有显著的影响。

6. 光解作用和光互变异构现象

用能量较大的激发光照射荧光物质，有时会使荧光强度减弱，不能得到稳定值，这有可能是荧光化合物发生光化学反应。不同荧光物质荧光强度的变化过程也不同，有的是开始荧光强度逐渐增强，达到一定值后稳定；有的增加到一定强度后逐渐减弱，这也可能是激发态时的互变异构现象，即光互变异构现象。在定量测定之前要考察荧光强度的稳定性。

7. 散射光和拉曼光的影响

测定稀溶液的荧光光谱时，所得到的并不单是荧光物质的荧光带，还包括溶剂的瑞利散射光，拉曼光等其他一些谱带。光子与分子碰撞时，光子只改变其运动方向，而频率并不发生变化，称为瑞利散射。光子与分子相互作用而产生散射时，导致散射光子频率的变化，称为拉曼效应。瑞利散射光波长与激发光一致，拉曼光波长随激发光的波长变化，荧光的波长是由荧光物质决定的。拉曼光的偏光很强。拉曼光的波长常和荧光的波长靠近，拉曼光对荧光分析的干扰一定要注意。

8. 表面活性剂的影响[7]

表面活性剂绝大部分在以胶束存在的情况下，具有增溶、增敏、增稳等许多优点。极性小难溶于水的物质，在胶束存在下的溶解度明显增大，可在胶束水溶液中进行分析。在胶束

水溶液中荧光的增强，是量子产率 Φ_f 或激发波长上荧光物质对激发光的摩尔吸光系数 ε 的增大，或者两者都增大的总效果。胶束对荧光质点的保护作用，除直接导致荧光寿命增长、量子效率提高、荧光强度上的增强外，还会增加荧光体系随时间的稳定性及改善实验条件。但要注意，不同的荧光体系要求不同性质的表面活性剂。

9. 共存物质的干扰

共存物质的主要干扰有：共存物质的荧光猝灭作用；共存物质产生荧光；共存物质与荧光物质发生反应；共存物质吸收激发光或荧光使荧光强度减弱等。要采取相应的措施消除干扰。当有大量干扰物质共存时，应先予以分离。若共存干扰物质浓度较低且影响不大时，分析组分的浓度可按下式计算，

$$F=F_0\frac{1}{1+kC'} \qquad (22\text{-}10)$$

式中，C' 为干扰物质的浓度；F 为干扰物质共存时的荧光强度；F_0 为无干扰时的荧光强度；k 为比例常数。通过标准加入法求出 F_0，若 $F_0=F$ 时，就说明荧光猝灭物质并不存在。

六、溶液荧光-猝灭

荧光猝灭一般指任何可使某种给定荧光物质的荧光强度下降的作用。狭义地说，荧光猝灭指的是荧光物质分子与溶剂分子或溶质分子之间所发生的导致荧光强度下降的物理或化学作用过程。与荧光物质分子发生相互作用而引起荧光强度下降的物质，称为荧光猝灭剂。

荧光猝灭过程分为两种形式：

第一种：基态荧光性分子 P 与猝灭性分子 Q 之间生成配位化合物 PQ，从而使荧光物质丧失荧光性。由这种机理引起的猝灭是静态猝灭，其猝灭的温度系数为负值，溶液的吸收光谱发生某些变化。

静态猝灭： $P+Q \rightleftharpoons PQ$，$PQ+h\nu \longrightarrow$ 光能消失

第二种：激发态荧光性分子 P^* 与猝灭性分子 Q 碰撞而失去能量，称为动态猝灭。动态猝灭的温度系数为正值，溶液的吸收光谱不变。

动态猝灭： $P+h\nu \longrightarrow P^*$，$P^*+Q \longrightarrow P+Q$

动态猝灭服从 Stern-Volmer 方程，

$$\frac{F_0}{F}=1+K_{SV}[Q] \qquad (22\text{-}11)$$

或

$$\frac{\tau_0}{\tau}=1+K_{SV}[Q] \qquad (22\text{-}12)$$

式中，F_0 为 Q 不存在时的荧光强度；F 为 Q 存在时的荧光强度；$[Q]$ 为猝灭剂浓度；K_{SV} 为 Stern-Volmer 猝灭常数；τ_0 为不存在猝灭剂时荧光分子的平均寿命；τ 为猝灭剂存在时荧光分子的平均寿命。

荧光分析中遇到的荧光猝灭原因有多种多样，下面讨论几种有代表性的原因。

（一）浓度猝灭

对于气态或液态的纯荧光物质，其浓度达到某些程度之后荧光强度开始降低，这种现象叫浓度猝灭。浓度猝灭有两个原因，一是因激发态分子与基态分子碰撞造成的动态猝灭；另一原因是基态分子缔合造成的静态猝灭。也有负的浓度猝灭现象。

（二）氧分子猝灭

很多的荧光物质，特别是芳香族碳氢化合物的荧光会被氧猝灭。在溶液中氧分子的猝灭

作用大小因荧光分子的结构及溶剂介电常数而异。没有取代基的芳香族化合物，氧分子的猝灭作用大；有取代基的芳香族及杂环化合物，氧分子猝灭作用小。有机溶剂中猝灭作用大，水溶液中猝灭作用小。对氧分子猝灭作用的一种解释为，三重态的氧分子和激发单重态的荧光分子碰撞形成了激发单重态的氧分子和三重态的荧光分子。还有一种解释为顺磁性的氧分子增加了自旋轨道的相互作用，助长了系统间交叉（$S_1 \rightsquigarrow T_1$，$T_1 \rightsquigarrow S_0$）的速度。

（三）顺磁性离子猝灭

顺磁性金属离子，特别是 3d 轨道未填充满电子的过渡金属离子，如 Fe(Ⅱ)，Ni(Ⅱ)，Cr(Ⅲ)，Cu(Ⅱ)，Co(Ⅱ)等对荧光性分子显示出很大的猝灭作用。一般解释为：荧光性分子的 π 电子与顺磁性离子的轨道相互作用形成特殊的能级，或者是由于顺磁性离子的有色吸收将荧光分子的能量转化为热能，增加了系统间交叉的速度。

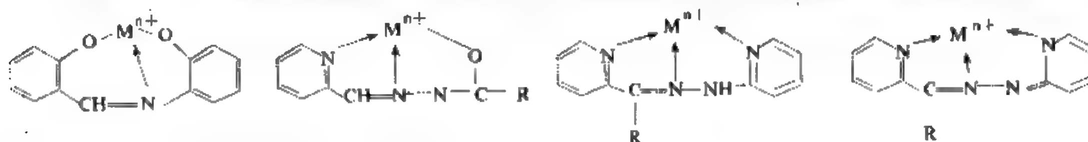
使荧光猝灭的其他原因，有些在前面环境因素对荧光强度的影响中已讨论过，这里不再赘述。

第二节　荧光分析常用荧光试剂[8~14]

本身具有荧光性质的化合物，可直接进行荧光测定。但许多有机化合物、生物物质和绝大多数无机化合物不发荧光或显现很弱的荧光，无法直接测定。可以将被测物与某种试剂发生反应，利用荧光的呈现或猝灭来测定某种组分。一般称无机荧光分析中使用的有机试剂为荧光试剂，有机和生物物质分析中使用的试剂为荧光探针。本节主要介绍有机荧光试剂，兼涉及一些有机荧光探针。常用的荧光试剂有十多类。

一、席夫碱类、腙类及其类似物[15]

这一大类化合物具有多齿配位基，其中含有 —HC═N— 结构，是易形成共轭大 π 键的电子流动桥。它们与 M^{n+} 配位时，构成一个平面、刚性、大 π 共轭的荧光特征结构，是一类理想的荧光分析试剂。它主要测定的金属离子为 Al、Ga、Be、In、Zr、Mg、Sc、Ge、Zn、Fe、Mn、Ag 等。当试剂与金属离子 M^{n+} 配位时，形成的配位化合物结构都十分相似，如：



参见表 22-1 中编号 1～44 的试剂。

二、蒽　醌　类

常用的蒽醌类荧光试剂为蒽醌的羟基及氨基衍生物。其配位原子为 O 和 N，都是硬碱，主要用于硬酸类的碱金属离子和碱土金属离子的测定。蒽醌的氧化产物也具有特征荧光，利用这一特点发展了某些具有氧化性的高价金属离子的重要荧光分析方法。蒽醌试剂一般灵敏度不高，但可在水相中测定荧光，对荧光分析方法较少的碱金属离子、碱土金属离子和某些过渡金属离子的荧光分析有实际意义。参见表 22-1 中编号 45～56 的试剂。

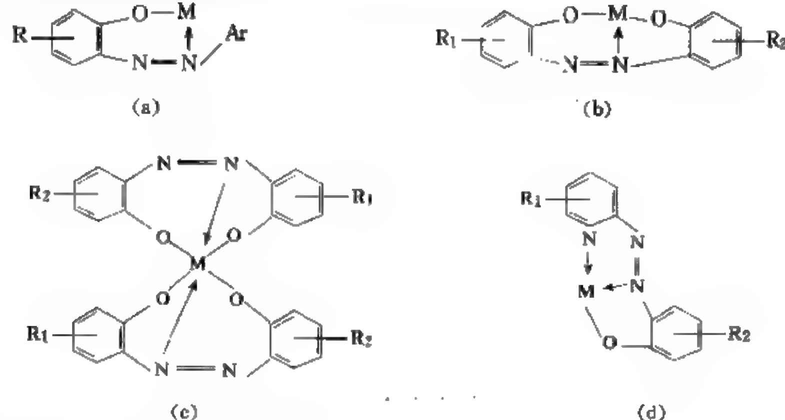
三、喹　啉　类[16,17]

8-羟基喹啉（Ox）及其衍生物都是使用较早、应用广泛的荧光分析试剂，但其选择性和灵敏度较差。而在体系中加入表面活性剂后，灵敏度、选择性、实验条件均大为改善，使应

用有了新的发展。近年来，8-氨基喹啉（AQ）及其衍生物得到开发和应用。因其为“氮-氮”型同种配位原子螯合剂，主要与亲氮金属生成稳定的配合物，其选择性较高。见表22-1中编号57～69的试剂。

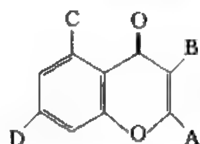
四、偶　氮　类

偶氮荧光试剂在荧光分析中广为使用，主要包括邻羟基偶氮试剂和杂环偶氮试剂。主要用于Al、Ga、In、Be、Sc、Mg、Co、Ca等的荧光分析和某些阴离子的测定（如氟）。偶氮试剂与金属离子生成螯合物的结构如下：



参见表22-1中编号70～133的试剂。

五、苯并吡喃酮类

苯并吡喃酮衍生物的基本结构为：

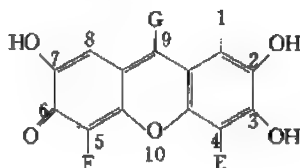
。荧光分析中常用的桑色素、栎精是其多羟基的衍生物。α位的苯基取代后就是黄酮类。多羟基黄酮荧光体系中加入表面活性剂后可产生强烈的增感作用，选择性也有所提高。苯并吡喃酮类最大的优点是可在水相中工作，形成三元配合物可以提高灵敏度和选择性，是很有价值的荧光试剂。参见表22-1中编号134～146的试剂。

六、β-或γ-二酮类

β-二酮类是镧系元素的重要荧光试剂。在镧系元素β-二酮类二元体系中，加入一种“协同试剂”形成“协同加合物”而产生协同效应，可提高荧光分析的选择性和灵敏度，这是稀土荧光分析的重要途径。参见表22-1中编号147～161的试剂。

七、荧光素、荧光酮等酸性染料[18,19]

三羟基荧光酮类试剂的结构如下所示：



这类试剂具有刚性和平面结构的共轭大π键体系，在紫外或可见光照射下，能发一定波长、一定强度的荧光。当荧光酮类试剂中的6-位羟基及7-位羟基与金属离子配合后，由于结构的改变，分子即失去荧光。所生成的二元配合物，若电荷未中和，则可选择带相反电荷的表面活性剂，缔合成三元配合物。在表面活性剂存在下，荧光酮类荧光猝灭反应的灵敏度大大提高，检测限降低，其应用得到长足的发展。已测定的高价金属离子有：W(Ⅵ)、Mo(Ⅵ)、Cr(Ⅵ)、V(Ⅴ)、Nb(Ⅴ)、Ta(Ⅴ)、Ti(Ⅳ)和Ge(Ⅳ)等。这些元素一般在较高酸度下进行测定，低价元素一般不干扰测定，高价离子之间的相互干扰采用加入适当掩蔽剂的方法进行。已测定的中低价金属离子有：Fe(Ⅲ)、Al(Ⅲ)、Sb(Ⅲ)、Ru(Ⅲ)、Ga(Ⅲ)、Co(Ⅱ)、Pd(Ⅱ)等，这些离子一般在近中性或碱性介质中进行测定。参见表22-1编号162～187的试剂。

八、罗丹明类等碱性染料

M^{n+}—X^-—碱性染料体系荧光分析仍是活跃的领域，主要原因是试剂易得，操作方便。罗丹明类染料是其中应用最广的一类碱性染料。见表22-1中编号188～200的试剂。

九、大环化合物

大环化合物是灵敏度、选择性较高的一类荧光试剂。卟啉类可测定Mg、Zn、Sn、Cu等。以冠醚进行荧光分析限于碱金属及碱土金属离子。大环化合物作荧光试剂是有很大潜力的。见表22-1中编号201～214的试剂。

十、酚类和芳胺类化合物

这类试剂具有平面、共轭大π键，它们含有—OH、—NH_2等给电子基团，又是很好的配位基团。有许多试剂是有机小分子化合物，试剂易得，是很常用的荧光试剂。见表22-1中编号215～238的试剂。

十一、其他试剂

有些荧光试剂难以归入上面10类，都放在其他试剂里面。见表22-1中编号239～275的试剂。

表22-1 常用荧光试剂[20-22]

编号	试剂名称（常用名或化学名）	结构式	应用
1	2,4-二羟基苯甲醛异烟酰腙 (DHBI)	(吡啶-4-基)—C(=O)—NH—N=CH—(2,4-二羟基苯基)，OH，OH	Al
2	丁二酮单肟缩菸酰腙 (BAMNHI)	(吡啶-3-基)—C(=O)—NH—N=C(CH_3)—C(CH_3)=NOH	Ti, Zr, Hf
3	吡哆醛菸酰腙 (PNH)	(吡啶-3-基)—C(=O)—NH—N=CH—(吡啶环：OH，CH_3，N，CH_2OH)	Mg, Zn, S^{2-}(H_2S)

续表

编号	试剂名称（常用名或化学名）	结构式	应用
4	吡哆醛异烟酰腙	O; N; C—NH—N—CH; HO; CH$_3$; N; CH$_2$OH	Al，Mn
5	邻苯二胺缩双吡哆醛（BPDIB）	CH$_2$OH; N═CH; N; HO; CH$_3$; HO; CH$_3$; N═CH; N; CH$_2$OH	Cr
6	双［4-（α-萘偶氮）-水杨醛］缩邻苯二胺（BNASPD）	N═N; CH═N; OH; OH; N═N; CH═N	Cu
7	水杨醛缩氨基硫脲（HBTS）	OH; S; CH═N—NH—C—NH$_2$	Ga，In，Fe，Mn，Zn，Ag
8	3，5-二溴水杨醛缩氨基硫脲（3，5-DBSTS）	Br; OH; S; CH═N—NH—C—NH$_2$; Br	Ag
9	3-甲基水杨醛缩氨基硫脲	OH; S; CH$_3$; CH═N—NH—C—NH$_2$	Ga
10	3-羟基水杨醛缩氨基脲	OH; O; HO; CH═N—NH—C—NH$_2$	Ga，Sc
11	水杨醛异烟酰腙	O; HO; N; C—NH—N═CH	Ga
12	二溴水杨醛异烟酰腙（DBSIN）	Br; N; C—NH—N═CH; O; HO; Br	Sc
13	水杨醛腙	OH; CH═N—NH$_2$	Al
14	水杨醛甲酰腙	O; OH; CH═N—NH—C—H	Zr，Zn

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
15	水杨醛硫代羰酰腙(SATCH)	(2-OH-苯环)—CH=N—NH—C(=S)—H	Ga,Zn
16	水杨醛苯甲酰腙	(2-OH-苯环)—CH=N—NH—C(=O)—苯环	Al
17	3-羟基吡啶-2-醛-2-吡啶基腙	(3-OH-吡啶)—CH=N—NH—(2-吡啶)	Al
18	苄基-2-吡啶酮-2-吡啶腙	(N-CH$_2$-苯环-吡啶)=N—NH—(2-吡啶)	Ga,Cd,Zn
19	二吡啶乙二醛腙	(2-吡啶)—C(=N—NH$_2$)—C(=N—NH$_2$)—(2-吡啶)	Co
20	苯基-2-吡啶酮腙(FPKH)	(N-苯基-吡啶)=N—NH$_2$	Cu
21	苯甲基-2-吡啶酮-2-喹啉基腙	(N-CH$_2$-苯环-吡啶)=N—NH—(2-喹啉)	Zn
22	二吡啶乙二醛二苯腙	(2-吡啶)—C(=N—NH—苯环)—C(=N—NH—苯环)—(2-吡啶)	Au
23	2,2′-双吡啶酮腙(DPKH)	(2-吡啶)$_2$C=N—NH$_2$	Au,Cu,Hg,Pt
24	芴-2-甲醛-2-吡啶腙	(芴-2-基)—C=N—NH—(2-吡啶)	Mg

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
25	3-羟基吡啶-2-醛-2-吡啶基腙	OH; N; CH=N—NH; N	Al,Co
26	3-氨基皮考啉醛缩氨基硫脲	NH_2; N; CH=N—NH—C(=S)NH_2	Mg
27	3-羟基皮考啉醛缩氨基硫脲	OH; N; CH=N—NH—C(=S)—NH_2	Mg,Mn
28	吡啶-2-醛-2-呋喃甲酰腙	N; CH=N—NH—C(=O); O	Ga
29	吡啶-2-醛-2-吡啶甲酰腙	N; CH=N—NH—C(=O); N	Ti
30	噻吩-2-醛-2-喹啉腙	S; CH=N—NH; N	Zn
31	水杨醛-2-苯并噻唑腙	OH; CH=N—NH; N; S	Zn
32	水杨醛缩-2-羟基-5-磺基苯胺	OH; CH=N; HO; SO_3H	Ga,Al
33	2-羟基-1-萘甲醛缩氨基硫脲(HNT)	OH; CH=N—NH—C(=S)—NH_2	Ga,Al
34	亚水杨基-4-氨基安替比林	CH_3; H_3C; N; N; OH; CH=N; O	Zr
35	间二羟基苯甲叉半胱氨酸	HO; OH; CH=N—CH; CH_2SH; COOH	Al,Ga
36	苯并咪唑-2-醛-喹啉腙(BAQH)	N; N; CH=N—NH; N	Zn
37	异烟碱醛-2,4-二羟基苄基腙	N; CH=N—NH—CH_2; HO; OH	Al

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
38	2-(亚水杨基氨基)-3-羟基芴	OH HO, N=CH	Ga
39	双亚水杨基乙二胺	OH, CH=N—CH_2CH_2—N=CH, HO	Mg
40	N,N'-双水杨叉-2,3-二氨基苯并呋喃(SABF)	O, N=CH, HO, HO, N=CH	Mg
41	3,5-二溴水杨醛缩氨基吡啶(DBSAP)	Br, OH, CH=N, N, Br	季铵盐
42	4-二甲氨基苯邻二甲酰肼	H_3C, N, H_3C, O, C—NH—NH_2, C—NH—NH_2, O	Cu
43	4-氨基苯邻二甲酰肼	H_2N, O, C—NH—NH_2, C—NH—NH_2, O	Pb
44	2-羟基苯甲醛吖嗪;2-羟基苯甲醛连氮	OH, CH=N—N=CH, HO	Cu
45	胭脂红酸	CH_3 O OH, CO(CHOH)$_4CH_3$, HO, HOOC O OH, OH	Mo,W
46	1,4-二羟基蒽醌;醌茜	O OH, O OH	Be
47	1,5-二羟基-4,8-二氨基蒽醌-2,6-二磺酸钠	NH_2 O OH, SO_3Na, NaO_3S, OH O NH_2	V,Ce,Fe
48	1,8-二羟基蒽醌;柯嗪	OH O OH, O	Mg,Li
49	1,4-二氨基蒽醌	O NH_2, O NH_2	Ca,Be

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
50	1-羟基-4-氨基蒽醌		V,Be,Li,B
51	1,4-二氨基-2,3-二羟基蒽醌		Fe,Tl
52	1-羟基-2-羧基蒽醌		Al,Be,Y,Mg
53	茜素红,茜素红 S		V,W,B
54	1,5-二羟基蒽醌		Mg
55	核固红		B,Cu
56	1,4-二羟基醌		Y
57	8-羟基喹啉(Ox)		Li, Al, Mg, Zn, Mo,Sn,Ga,In,Hf,Zr
58	8-羟基喹啉-5-磺酸(H_2QS)		Zn, Co, Be, Mn, Al, Cd, Ag, Sn, Mg, In, Sc, La, Y, Ce, Zr, CN^-, Tl
59	5,7-二氯代-8-羟基喹啉		Y,Sc,La,Al

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
60	5,7-二溴代-8-羟基喹啉		Li
61	8-(苯磺酰氨基)喹啉		Cd
62	8-(对甲苯磺酰氨基)喹啉(QTS)		Zn
63	8-巯基喹啉		Zn,Cd
64	7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸;高铁试剂;试铁灵;Ferron;H_2QSI;7-I-H_2QS		Al, Cd, Fe, Zn, Mg, Lu, Zr, Nb, Mo, CN^-, NO_2^-
65	2-甲基-8-羟基喹啉;8-羟基喹哪啶;邻羟基喹哪啶		Ga,In,Be
66	5,7-二硝基-8-羟基喹啉		Sc
67	2,2'-甲亚氨基双(8-羟基喹啉)		Y
68	硫酸-8-羟基喹啉		卤素离子 X^-
69	8-氨基喹啉		Pd

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
70	偶氮胂Ⅰ		Be
71	偶氮氯膦Ⅰ		Be
72	钍试剂;Thorin;Thoron		B
73	2,2'-二羟基偶氮苯;2,2'-偶氮酚		Al,Mg,Cd,Zn,Zr
74	2,2'-二羟基-4,4'-二甲基偶氮苯		Ge(罗丹明B存在)
75	4-(2'-羟基苯偶氮)-间苯二酚		Al,Ga,In,Sc
76	4-(5'-氯-2'-羟基苯偶氮)-间苯二酚		Ga
77	过铬紫Y;4-(5'-磺基-2'-羟基苯偶氮)间苯二酚		Al,Ga,In,Sc,F^-,Nb
78	2-(5'-磺基-2'-羟基苯偶氮)-5-甲氧基苯酚		Al,Ga
79	荧光镓试剂;2-(3'-磺基-5'-氯-2'-羟基苯偶氮)-间苯二酚		Al,Ga,In,F^-,Nb,V,W
80	己基荧光镓试剂(Ⅰ)		Ga
81	十二烷基荧光镓试剂(Ⅱ)	R=C_6H_{13}(Ⅰ);$C_{12}H_{25}$(Ⅱ)	Ga
82	4-(3'-胂酸基-5'-氯-羟基苯偶氮)间苯二酚;Rezarson		Ge

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
83	溶托铬 VSW；1-(5′-磺基-2′-羟基苯偶氮)-2-萘酚		Al
84	Flazo 橙；1-(5′-氯-2′-羟基苯偶氮)-2-萘酚		Al
85	媒染蓝 31；磺基苯酚偶氮变色酸；MB31		Al, Ga, Sc
86	1-(3′-磺基-5′-氯-2′-羟基苯偶氮)-2-苯酚		Mg
87	媒染蓝 9；2-(3′-磺基-5′-氯-2′-羟基苯偶氮)-1-羟基-5-萘磺酸		Al
88	硝基镁试剂；1-(3′-磺基-5′-硝基-2′-羟基苯偶氮)-2-苯酚		Al
89	荧光镁试剂；2-(3′-磺基-5′-氯-2′-羟基苯偶氮)巴比土酸		Al, Ga, In, Mg, Mn
90	羟基萘酚蓝(HNB)；1-(2-羟基萘偶氮-3,6-二磺酸)-2-萘酚-4-磺酸		Al, UO_2^{2+}
91	4-[4-(3′-胂酸基-5′-氯-2′-羟基苯偶氮)-3-羟基-5-甲基吡唑]苯磺酸		Mg
92	依来铬蓝黑 B；溶托铬蓝黑 R(PCBBR)；插洛洛铬蓝黑 R(SCBBR)；磺基偶氮萘酚		Al, Co, Fe

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
93	4-(4'-磺基-2'-萘酚-1'-偶氮)间苯二酚		Al,Ga,In,Ce
94	播洛黑 AS;1-(4'-磺基-5'-硝基-2'-羟基萘偶氮)-2-萘酚		Ga
95	播洛黑 WEFA;1-(4'-磺基-6'-硝基-2'-羟基萘偶氮)-2-萘酚		Ga
96	播洛红 ERS		Ga,Al,F^-
97	依来铬红 B;铬红 B;酸性铬红;羊毛铬红 B		Al,F^-
98	4-(4'-磺基-2'-萘酚-1'-偶氮)-5-吡唑酮		Mg
99	钙试剂;1-(4'-磺基-2'-羟基萘偶氮)-2-羟基-3-萘酸		Be,Al
100	7-(4'-磺基-2'-羟基萘偶氮)-8-羟基喹啉		Mg
101	2-(5'-磺基-2'-羟基苯偶氮)-4-乙氨基-5-甲酚(SPAEC)		Al,Ga
102	1-(2'-吡啶偶氮)-2-萘酚(PAN)		Al,F^-,Co,Ni,Yb

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
103	4-(2'-吡啶偶氮)-间苯二酚(PAR)		V
104	镉试剂A;对硝基苯重氮氨基偶氮苯		Ag
105	7-(2',4'-二羟基苯偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸(DHB-8Q5S)		Al
106	7-(8'-羟基-3',6'-二磺基萘偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸		Mn,Co
107	7-(8'-羟基喹啉-5'-磺酸-7'-偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸(HQSAHQS)		Mg
108	7-(8'-羟基喹啉偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸(8QA8Q5S)		Mg
109	5-(4'-硝基苯偶氮)-8-(4-甲苯磺酰氨基)-喹啉(NPTSQ)		Co
110	7-(2'-胂酸基-5'-羧基苯偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸(5-CarAsA-8Q5S)		Be
111	7-(4'-甲基-2'-胂酸基苯偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸(4-MASA-8Q5S)		Al,Be,F^-
112	5-(4'-胂酸基苯偶氮)-8-氨基喹啉(APAQ)		Cu,Co,Ni

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
113	5-(4'-甲氧基苯偶氮)-8-(对甲苯磺酰氨基)喹啉(MOPT-SQ)	$CH_3O-C_6H_4-N=N-$(喹啉-5-基)，8位$-NHSO_2-C_6H_4-CH_3$	Co
114	8-氨基喹啉-5-偶氮-对苯磺酸钠(AQAPS)	H_2N-(喹啉-8-基)，5位$-N=N-C_6H_4-SO_3Na$；SO_3H	Cu

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
123	5-(4'-氯-2'-羧基苯偶氮)绕丹宁(CRACP)	COOH O NH Cl —N=N— S S	Cu
124	酸性铬蓝K(ACBK);5-磺基-4'-二乙氨基-2,2'-二羟基偶氮苯	OH HO —N=N— $N(C_2H_5)_2$ HO_3S	Al
125	5-苯基偶氮-8-氨基喹啉(PAQ)	—N=N— NH_2 N	Au,Cu,Cr
126	8-氨基喹啉-5-偶氮-对苯酚(AQAPOH)	HO— —N=N— NH_2 N	Au,Cr,Os
127	5-(4'-氯苯偶氮)-8-氨基喹啉(AQAPCl)	Cl— —N=N— NH_2 N	Cr
128	5-(4'-甲氧基苯偶氮)-8-氨基喹啉(MOPAQ)	CH_3O— —N=N— NH_2 N	Au,Cu
129	5-(4'-羧基苯偶氮)-8-氨基喹啉(CPAQ)	HOOC— —N=N— NH_2 N	Cu
130	5-(2'-羟基苯偶氮)-8-氨基喹啉(HPAQ)	—N=N— NH_2 OH N	Au,Cu
131	5-(4'-硝基苯偶氮)-8-氨基喹啉(NPAQ)	O_2N— —N=N— NH_2 N	Co
132	5-磺酸钠-7-偶氮苯-8-氨基喹啉(SPAQ)	SO_3Na N —N=N— NH_2	Co,Au

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
133	5-苯基偶氮-8-(苯基偶氮氨基)喹啉(PAPAQ)		Co,Cu
134	桑色素;Morin		Al,Be,Sn,Sc,Zn,Mo,W,Th,Zr,Hf,Ge,Nb,Ga,Ta
135	槲皮素;栎精		Sn,Sc,Th,Hf,Zr,Ge,Nb,Ga,B
136	黄酮醇		W,Be,B,SO_4^{2-},Th,Zr
137	5-羟基黄酮		Be,U,Th
138	黄酮醇-2'-磺酸		Zr,Tl,Th
139	杨梅黄素		Th,Mo,Zr,Hf,Sc
140	3,4',7-三羟基黄酮		Sb,Sn,Zr
141	2-甲基-3-乙基-5-羟基-4-苯并吡喃酮		Ti

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
142	3-羟基苯并吡喃酮		Sc,Hf
143	3,7-二羟基黄酮		Sb,Sn
144	3-羟基-4',5,7-三甲氧基黄酮		Al,Zr,Sc,Hf
145	栎精-7-葡糖甙		Zr,Hf
146	3,3',4',5,7'-五羟基黄酮-2-葡糖甙		Sc,Hf
147	乙酰丙酮(AA)	$CH_3-CO-CH_2-CO-CH_3$	Tb,Eu,Dy,Sm
148	三氟乙酰丙酮(TFA)	$CF_3-CO-CH_2-CO-CH_3$	Eu,Sm,Tb,Dy
149	六氟乙酰丙酮(HFA)	$CF_3-CO-CH_2-CO-CF_3$	Eu,Sm,Tb,Dy
150	2-噻吩甲酰三氟丙酮(TTA)	$-CO-CH_2-CO-CF_3$	Eu,Sm
151	苯甲酰丙酮(BA)	$-COCH_2COCH_3$	Eu,Sm,Tb,Dy
152	苯甲酰三氟丙酮(BTA)	$-COCH_2COCF_3$	Eu
153	2-萘甲酰三氟丙酮(2-NTA)	$-COCH_2COCF_3$	Sm,Eu
154	2-(2,2-二苯基乙酰基)-1,3-茚满二酮(其钠盐:DPN)		Tb,Sm,Eu

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
155	茚三酮		酸氨胺
156	1-苯基-3-甲基-4-苯甲酰基-吡唑酮-5(PMBP)		Eu,Sm,Tb,Dy
157	1,5-双(1'-苯基-3'-甲基-5'-吡唑酮-4'-基)-1,5-戊二酮(BPMPPD)		Dy
158	1,6-双(1'-苯基-3'-甲基-5'-吡唑酮-4'-基)-1,6-己二酮(BPMPHD)		Tb
159	1,4-双(1'-苯基-3'-甲基-5'-吡唑酮-4'-基)-1,4-丁二酮(BPMPBD)		Tb
160	二苯甲酰甲烷(DBM)	$C_6H_5-COCH_2CO-C_6H_5$	Eu,Sm,Tb,Dy
161	三甲基乙酰丙酮	$(CH_3)_3CCOCH_2COCH_3$	Eu,Sm,Tb
162	水杨基荧光酮(SAF)		Fe, Co, Cr, Pd, Mo, Ti, Ga, W, F^-
163	5-溴-水杨基荧光酮(5-Br-SAF)		Ti
164	苯基荧光酮;苯芴酮(PF)		Ti, Al, Fe, Mo, Nd, Sb, Ga

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结 构 式	应 用
165	2,3,7-三羟基荧光酮		Ti,Ga,Nd
166	二溴苯基荧光酮(DBPF)		Bi,Cr,Al,Cd,Mo,Ti,Sb,Nb
167	二溴羟基苯基荧光酮(DBH-PF)		Cr,Mo,W,Br^-
168	5′-硝基-水杨基荧光酮(5′-N-SAF)		Mo
169	邻氯苯基荧光酮(*o*-ClPF)		Mo,W,Ti,V,Sn,Ga,Ge
170	2,4-二甲氧基苯基荧光酮(DMPF)		Ti
171	4-甲基伞形酮(4-MU);4-甲基-7-羟基香豆素		奎宁,苦味酸
172	4 羟基香豆素		NO_2^-
173	4-甲基-7-羟基香豆素-6-磺酰氯(MUS-Cl)		氨基酸

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
174	曙红(TBF);四溴荧光素		Pd,Ag,Ni,Zn,Co,Cd,Pb,Mn,Au,Hg
175	乙基曙红		Pd
176	二溴荧光素		Zn,Cd,Cu
177	二氯荧光素(DCF)		I^-
178	四碘荧光素		Pd,Pb,Cd
179	四氯荧光素		Ag
180	还原型二氯荧光素(RDCF)		Fe,Cu

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结 构 式	应 用
181	荧光素(FL)		Mn, S^{2-}, VB_2
182	钙黄绿素(CB); Calcein		Ca, Cd, Mg, Mn, Cu, Al, Hf, Zr, F^-, CN^-, SO_4^{2-}
183	硫化荧光素(FMS)		Hg
184	荧光素汞(FMA-Hg)		Ag
185	5-氨基荧光素		NO_2^-
186	溴邻苯三酚红(BPR)		Ti, Ag
187	9-萘基取代荧光酮(β-HNF)		Mo
188	罗丹明 S	$R=CH_3$ 或 $R=C_2H_5$	Cd, Hg

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
189	罗丹明 B(RhB)	$(C_2H_5)_2N$, O, $\overset{+}{N}(C_2H_5)_2Cl^-$, COOH	Mo, W, Mn, B, Pd, Hg, Cu, Au, Pb, Cd, Zn, Sb, As, Br^-, Re, U, In, Tl, Ga
190	罗丹明 6G(R6G)	H_5C_2HN, O, $\overset{+}{N}HC_2H_5Cl^-$, $COOC_2H_5$	Tl, Te, Ta, Ga, Cd, Si, Mo, As, P, Mn, Sb, Pd, B, NO_2^-, NO_3^-, Ru
191	丁基罗丹明 B	$(C_2H_5)_2N$, O, $\overset{+}{N}(C_2H_5)_2Cl^-$, $COOC_4H_9$	Ta, Ga, Pd, Hg, Co, Au, Ag, B
192	罗丹明 3B(Rh3B);乙基罗丹明 B	$(C_2H_5)_2N$, O, $\overset{+}{N}(C_2H_5)_2Cl^-$, $COOC_2H_5$	Ta, In, U
193	罗丹明 4G	C_2H_5HN, O, $\overset{+}{N}(C_2H_5)_2Cl^-$, $COOC_2H_5$	In, Ge, Ga
194	还原型罗丹明 B	$(C_2H_5)_2N$, O, $N(C_2H_5)_2$, COONa	Cr, V, Mn
195	还原型丁基罗丹明 B	$(C_2H_5)_2N$, O, $N(C_2H_5)_2$, $COOC_4H_9$	Cr, V
196	藏红 T	H_3C, N, CH_3, H_2N, $\overset{+}{N}$, NH_2, C_6H_5, $\cdot Cl^-$	Cr, Re, Sb, P
197	吖啶黄	H, N^+, Cl^-, H_2N, NH_2, CH_3, CH_3	Tl

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
198	吖啶橙	$(CH_3)_2N$, $N(CH_3)_2$, N^+—H Cl^-	Pd,Ga,Re,Tl,Sb,Au
199	吡啰红 Y;吡啰红 G;焦宁 G	$(CH_3)_2N$, O, $\overset{+}{N}(CH_3)_2Cl^-$	Mo,V,Cd,Pt,Pd,Hg,NO_2^-
200	劳氏紫-*N*,*N*,*N'*,*N'*-四乙酸(LVTA)	$HOCOCH_2$, $HOCOCH_2$, N, S, Cl^-, N^+, CH_2COOH, CH_2COOH	Al
201	*meso*-四苯基卟啉(TPP 或 H_2L)	R, N, NH, HN, N; R= —C_6H_5	Cu,Pd
202	*meso*-四(4-羟基苯)卟啉(T(4-HP)P)	R= —C_6H_4—OH	Cu,Zn
203	*meso*-四(4-氯苯基)卟啉	R= —C_6H_4—Cl	Al,Zn
204	*meso*-四(4-甲基-3-磺酸基苯基)卟啉($TTPS_4$)	R= —C_6H_3(SO_3H)—CH_3	Cu,Zn
205	*meso*-四(4-羧基苯)卟啉	R= —C_6H_4—COOH	Cu
206	*meso*-四(4-乙酰氧基苯)卟啉(T(4-AOP)P)	R= —C_6H_4—$OCOCH_3$	Cu
207	*meso*-四(对磺基苯)卟啉($TPPS_4$)	R= —C_6H_4—SO_3H	Cu,Co,Cd,CN^-
208	*meso*-四(3-氯苯基)卟啉	R= —C_6H_4—Cl (3-)	Zn
209	*meso*-四(4-吡啶基)卟啉(TPyrP)	R= —C_5H_4N	Cu
210	*meso*-四(*N*-甲基-3-吡啶基)卟啉(TMPyP 或 T(3-MPy)P)	R= —$C_5H_4N^+$—CH_3	Zn,Cu,H_2O_2,葡萄糖

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
211	5,10,15,20-四(1-甲基-4-吡啶鎓基)卟啉	R= —$\overset{+}{N}$—CH_3	Mg
212	*meso*-四(4-三甲铵基苯基)卟啉(T(4-TMAP)P)	R= —$\overset{+}{N}(CH_3)_3$	Cu,Zn,Mn
213	原卟啉IX二甲酯(PPDE)	$CH{=}CH_2$, CH_3, H_3C, $CH{=}CH_2$, HN, N, N, HN, H_3C, CH_3, $CH_3OOCCH_2CH_2$, $CH_2CH_2COOCH_3$	Mg,Zn,Sn
214	*N*-(4-甲基繖酮基-8-甲基)偶氮-18-冠-6	CH_3, O, O, —CH_2—N═N—, O, O, O, O, O, O	K,Ca
215	间苯二酚	HO, OH	敌敌畏
216	对苯二酚	HO—, —OH	Cu
217	邻氨基苯酚	H_2N, HO—	NO_2^-
218	磺基水杨酸(SSA)	COOH, HO_3S—, —OH	Eu,Dy,Tb,Sm
219	6-羟基水杨酸	OH, —COOH, OH	Tb,Dy,Sm
220	对羟基苯乙酸(PHOPAA)	HO—, —CH_2COOH	H_2O_2
221	对羟基苯丙酸(HPPA)	HO—, —CH_2CH_2COOH	葡萄糖
222	对乙酰氨基酚	HO—, —$NHCOCH_3$	Cr
223	2,3-二氨基萘(DAN)	—NH_2, —NH_2	Se,NO_2^-
224	邻羟基苯甲醛	—CHO, OH	Al,Ga,In,Sc,Zn

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结 构 式	应 用
225	间羟基苯甲醛	HO, CHO	Al,Ga,In,Sc,Zn
226	水杨酸苯酯;Salol;萨罗	OH, $COOC_6H_5$	Tb
227	焦宁;Pyronine	O, $(CH_3)_2N$, $N(CH_3)_2$	酸性药物
228	2-(邻羟基苯基)-苯并噻唑	S, N, HO	Be
229	3,5-二氨基苯甲酸盐酸盐(DABA)	COOH, $^-ClH_3\overset{+}{N}$, $\overset{+}{N}H_3Cl^-$	DNA
230	3,3'-二氨基联苯胺	H_2N, NH_2, H_2N, NH_2	Se
231	1-(二羧基甲基氨甲基)-2-羟基-3-萘甲酸(DHNA)	$-CH_2-N(CH_2COOH)_2$, HOOC, OH	Be,Ca,Zn
232	二苯胺磺酸钠	$-NH-$, $-SO_3Na$	Fe
233	丹酰氯;丹磺酰氯(DNS-Cl);1-二甲替氨基萘-5-磺酰氯	$(CH_3)_2N-$, $-SO_2Cl$	蛋白质,氨基酸
234	2-(邻羟基苯基)苯并噁唑	N, O, HO	Be,Cd
235	钛铁试剂;Tiron;1,2-二羟基苯-3,5-二磺酸钠;试钛灵	HO, OH, $-SO_3Na$, NaO_3S	Eu,Sm,Tb,Dy
236	2-羟 3-萘甲酸	COOH, OH	Be,Sc
237	8-苯胺基-1-萘磺酸(ANS)	$-SO_3H$, $-NH-$	Cu
238	L-酪氨酸	$HO-C_6H_4-CH_2CHCOOH$, NH_2	Ce

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
239	吡啶-2,6-二羧酸(DPA)	COOH, N, COOH	Eu, Tm, Tb, U, Sm, Dy
240	2,6-二氨基吡啶	NH_2, N, NH_2	NO_2^-
241	2-吡啶醛	N, CHO	Co
242	3-羟-2-吡啶醛	OH, CHO, N	Al, Ga, In, Sc, Zn
243	邻苯二甲醛(OPA)	CHO, CHO	氨基酸,蛋白质,有机胺
244	邻萘二甲醛	CHO, CHO	氨基酸,有机胺
245	吡嗪-2,3-二羧酸(PYDA)	N, COOH, COOH, N	Eu, Tb
246	2-吡啶苯甲酮	N, C=C	Al, Ga, In, Sc, Zn
247	2,2-双吡啶苯甲酮	N, C=C, C=O, N	Al, Ga, In, Sc, Zn
248	2,3-萘三唑	H, N, N, N	Ag
249	二苯胍(DPG)	NH—C—NH, NH	Eu
250	安息香	C—C, O, OH	B, Si

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
251	硫胺素；维生素 B_1		Mn、Si、P、Cu、Cr、Hg
252	9,10-二甲氧基蒽-2-磺酸钠(MAS)		叔胺类药物
253	芘		I_2
254	4,6-二脒基-2-苯基吲哚(DAPI)		DNA
255	一缩二甘醇酸(ODA)	$HOOC—CH_2—O—CH_2COOH$	Gd,Tb
256	三乙四胺六乙酸(TTHA)		Gd,Tb
257	亚氨基二乙酸(IMDA)	$HOOC—CH_2—NH—CH_2—COOH$	Gd,Tb
258	乙二醇二乙醚二胺四乙酸(EGTA)		Gd,Tb
259	吡哆醛-5-磷酸酯		Be
260	(2-羟乙基)替亚胺二乙酸(HIMDA)	$HOCH_2CH_2N(CH_2COOH)_2$	Gd,Tb
261	菲绕啉；邻菲罗啉；Ferroin		Re
262	黄烷醇		Sn,Hf,W,Zr

续表

编号	试剂名称(常用名或化学名)	结构式	应用
263	二苯并噻唑甲烷(DBM 或 DBTM)	苯并噻唑-2-CH_2-苯并噻唑	Li
264	荧光铜铁试剂;荧光铜铁灵	$(CH_3)_2N-C_6H_4-CH=C(COOH)-NH-C(=O)-C_6H_5$	Cu
265	曲酸;5-羟基-2羟甲基对氧芑酮	HO, O, CH_2OH (吡喃酮环)	Au
266	二甲替甲酰胺	$HCON(CH_3)_2$	Eu,Dy
267	对二甲胺基苄叉绕丹宁;银试剂	绕丹宁环(HN, O, S, S)$=CH-C_6H_4-N(CH_3)_2$	Cu,Au
268	1-(对磺基苯基)-3-甲基吡唑啉-5-酮	吡唑啉酮环(H_3C, N, N, O)$-C_6H_4-SO_3H$	Tb,Dy
269	光泽精	H_3C-N(吖啶环)—(吖啶环)$N-CH_3$	Co
270	二苯酰甲烷	$C_6H_5-C(=O)-CH_2-C(=O)-C_6H_5$	B
271	二羟基二苯甲酮(DHBP)	$(HO)C_6H_4-C(=O)-C_6H_4(OH)$	B
272	2-羟基-4-甲氧基-4'-氯二苯甲酮(HMCB)	$CH_3O-C_6H_3(OH)-C(=O)-C_6H_4-Cl$	B
273	3,5-双[N,N'-二(羧甲基)氨甲基]-4,4'-二羟基芪	$HO-C_6H_4-CH=CH-C_6H_2(OH)[CH_2N(CH_2COOH)_2]_2$	Sc
274	4,4'-二氨基-(N,N,N',N'-四乙酸)芪-2,2'-二磺酸	$(HOOCCH_2)_2N-C_6H_3(SO_3H)-CH=CH-C_6H_3(SO_3H)-N(CH_2COOH)_2$	Fe
275	双[1-吡啶基-3-甲基-5-羟基吡唑基]-4,4'-甲烷(BPPM)	吡唑环(H_3C, N, N, OH, 吡啶基)$-CH_2-$吡唑环(CH_3, N, N, HO, 吡啶基)	Tb,Dy

第三节 荧光仪器[1,2]

一、基本结构和部件

根据光学系统结构的不同，荧光测定装置主要分为荧光计和荧光分光光度计两类。两者获得单色光的方法不同，前者采用滤光片。后者采用棱镜或光栅等单色器。无论哪一种类型的仪器，组成部件中都包括光源、单色器（或滤光片）、样品室、检测器和读出装置。荧光分光光度计的基本结构如图 22-6 所示。在测定溶液的荧光时，一般都在与激发光垂直的方向测定荧光。分析固体试样时，一般与激发光方向成 45°或 90°夹角的方向测定荧光。下面对各部件加以概要介绍。

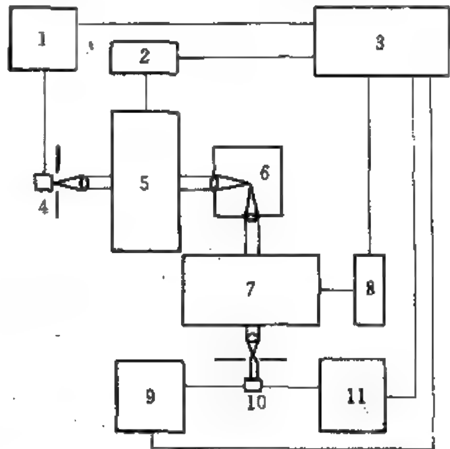


图 22-6 荧光分光光度计的方框图
1—稳压电源；2—扫描马达；3—控制系统；4—光源；5—激发单色器；6—样品室；7—发射单色器；8—扫描马达；9—绘图记录仪或光度表；10—光电倍增管；11—光电倍增管的电源

（一）光源

光源用来激发样品，荧光分析中一般用线光源汞灯或连续光源氙灯作激发光源。

1. 汞灯

汞灯有低压汞灯、中压汞灯和超高压汞灯之分，灯发射的线光谱随灯内汞的压强而变。图 22-7 中给出了各种汞灯的谱线分布。低压汞灯 253.7nm 谱线的强度最高，提高汞的蒸气压，253.7nm 线减弱，长波区的谱线增强。超高压汞灯（20～25 大气压）的谱线变宽。作为激发光源，低、中压汞灯用 253.7nm 线，超高压汞灯用 366nm 线。

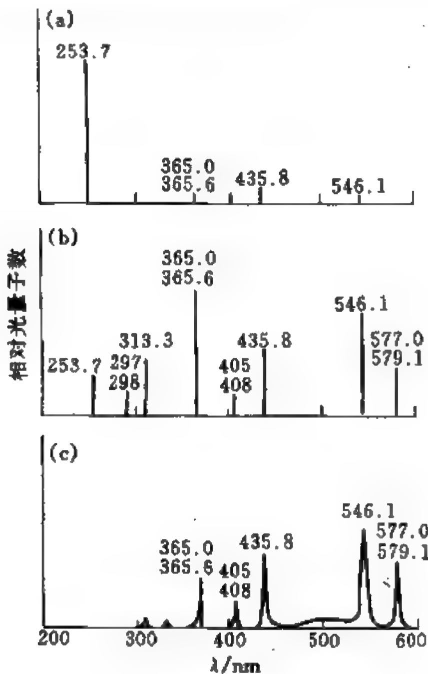


图 22-7 汞灯的谱线分布

2. 氙灯

氙灯在很宽的波长范围内发射很强的连续光谱（见图 22-8），氙灯的发光稳定。由图 22-7 和图 22-8 可见，汞灯和氙灯都有 250nm 左右的光谱发射。空气中的氧在波长小于 250nm 的紫外线照射下生成臭氧，因此氙灯应安装于氙灯室中，氙灯室起着导出氙灯的热气流和臭氧的作用。氙灯无论是在平时或工作时都处于高压之下，处理灯的时候不要忘记带防护眼镜。灯壳应保持清洁，沾有灰尘污物时会影响紫外线透过，必须用沾有乙醚的棉纱擦干净。氙灯使用寿命大约 2000h，报废的氙灯应裹上厚纸，并把石英壳敲碎，以免留下隐患。工作时，工作者不要直视光源，避免损伤眼睛。

3. 激光器

激光器发射的谱线强度大，单色性好，没有杂散光。激光光源既能克服高压汞灯相差悬殊的谱线

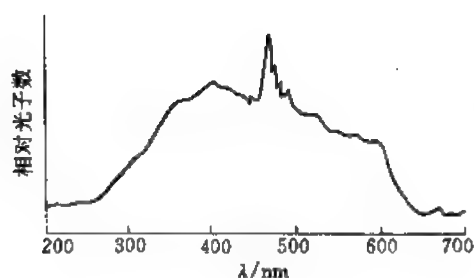


图 22-8　氙灯的光谱

于少数波长，虽不能满足各种各样待测物质的激发波长，但能克服氙弧灯在紫外区输出功率小的缺点。紫外激光器和可调谐激光器的应用，使荧光分析法迈向一个新的高度。用激光为光源，荧光分光光度计中仅用一个单色器即可。

（二）单色器和滤光片

将光源发出的连续光谱分解为单色光的装置为单色器。单色器由棱镜或光栅等色散元件及狭缝和透镜等组成。一般荧光分光光度计采用光栅作为色散元件。滤光片也起单色器的作用。

1. 光栅单色器

光栅有平面光栅和凹面光栅两类。平面光栅多采用机械刻制，机刻光栅的输出最强波长光被称为闪耀波长，其闪耀波长视用途而定。凹面光栅常采用全息照像和光腐蚀而成，全息光栅没有闪耀波长。光栅单色器的透射率为波长的函数，这是荧光体激发光谱和发射光谱变形的原因之一。光栅单色器的透射率与偏振光也有关。

光栅单色器有两个主要性能指标，即色散能力和杂散光水平。杂散光的定义为除去所需要的波长的光线以外，通过单色器的所有其他光线的强度。荧光测量的主要误差来自杂散光。

2. 滤光片

在所用的滤光片中玻璃滤光片和干涉滤光片是应用最广泛的。

（1）玻璃滤光片　玻璃滤光片含有各种不同的金属氧化物，因而呈现不同的颜色。它们透过的光线带宽较宽，且因受金属氧化物种类的限制，品种不多。但它具有稳定、经得起长期光照和便宜等优点。

（2）干涉滤光片　干涉滤光片是在一片玻璃上沉积两层或多层金属薄膜，每两层金属薄膜之间隔着一层不吸光的物质，然后在这玻璃片上粘盖着另一玻璃片以保护这些薄膜。干涉滤光片所透过光的波长取决于两金属薄膜之间的距离。干涉滤光片具有透射带宽较窄，透射率高，经得起强光源长期照射等优点。

用荧光分光光度计测量荧光强度时，常需要在激发光路和发射光路中分别插入合适的第一和第二滤光片，以进一步消除杂散光的影响。

（三）样品室

1. 液池

测定溶液试样时一般可用四面透明的方形或圆形液池。为了提高灵敏度或对荧光光谱进行校正时，当使用带有球面反射镜的液槽架或三角池，灵敏度可提高 3 倍。还有只需 0.1～0.3ml 的微型液池。常见的液池如图 22-9 所示。荧光仪器的附件中还有液相光谱用的微型流动液池。

对荧光测定液池的要求是：液池本身无荧光性；激发光和荧光的透过性好；一般都用石英池。

测定低温荧光及磷光时，使用与杜瓦瓶配合的毛细液池，根据需要也可以用低温恒温器，带有去气支路的液池，见图 22-10 中的(a)～(d)。

2. 固体试样座

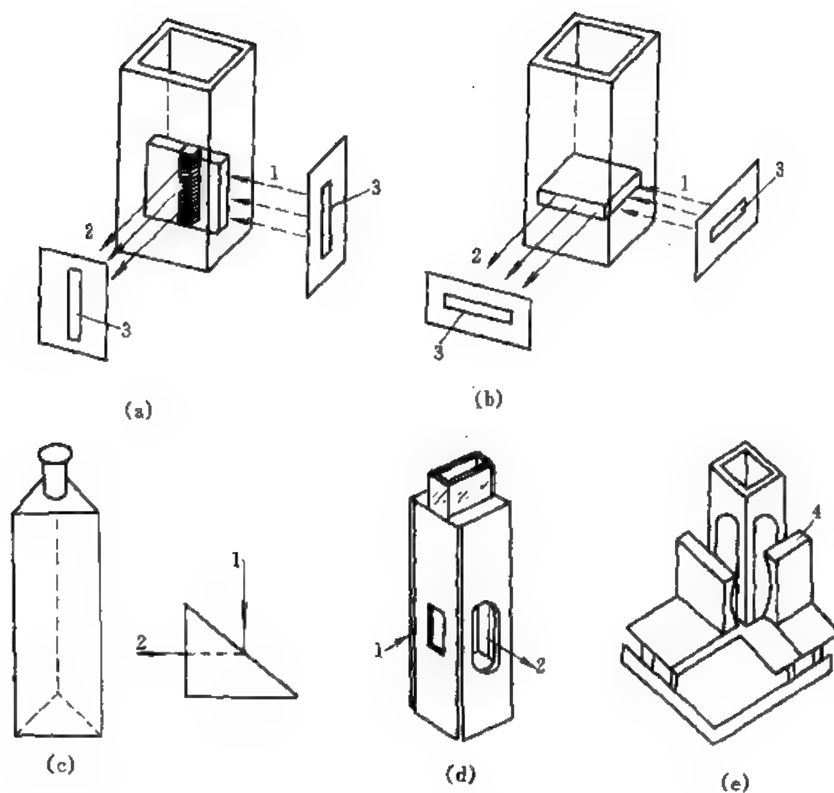


图 22-9 几种液池

(a) 一般仪器；(b) 日立 F-4500；(c) 三角池；(d) 微型池；(e) 带反射镜的高灵敏度液池架

1—激发光；2—荧光；3—狭缝；4—反射镜

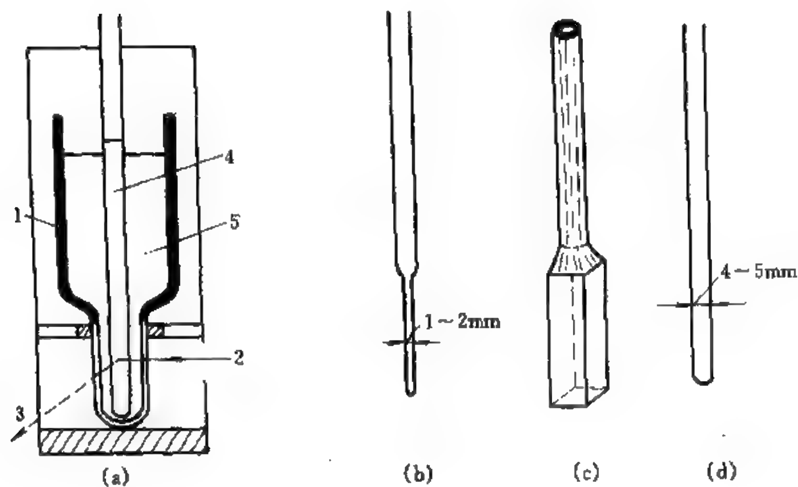


图 22-10 杜瓦瓶和低温荧光、磷光测定用液池

(a) 杜瓦瓶；(b) 毛细池；(c) 方形低温池；(d) 试管形液池

1—杜瓦瓶；2—入射光；3—磷光；4—试样溶液；5—液氮

分析固体试样，粉末试样和高浓度溶液时，通常使用粉末试样池或使用固体试样座来测定试样表面的荧光。

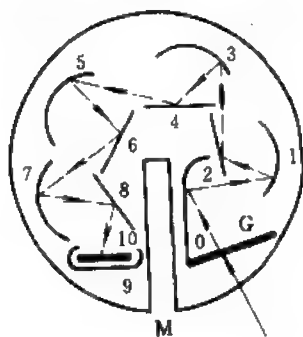


图 22-11 光电倍增管的结构
G—聚焦栅格；M—云母屏蔽；0—阴极；1～9—打拿极；10—阳极

（四）检测器

测定荧光强度时，将光强度转换成电流进行测量，这种光电转换器件称为检测器。荧光分光光度计采用光电倍增管（PMT）作为检测器。光电倍增管能将与微弱的光成正比的光电流大幅度地放大，从而获得较高的灵敏度。光电倍增管的结构如图 22-11 所示。

从阴极表面发出的光电子在被称为打拿极的二次电子倍增电极放大。第一个打拿极的电压比光电面高 100V，第二个又比第一个高 100V，以 100V 的电位差顺序升高，并依次放出光电子。光电流的放大倍数与施加的电压成指数关系。靠改变光电倍增管的施加电压，用一只光电倍增管即可获得数十万倍的光电流。光电倍增管的响应速度也很快（10^{-8}—10^{-9}s），适于用来观测微弱光的短时间过程。

几种有代表性的光电倍增管的光电特性如图 22-12 所示。PMT 的灵敏度受暗电流限制，暗电流主要由阴极和二次发射极的热电子发射和电极间的漏电流形成。电极间电压低时，暗电流主要来自漏电流；电极电压高时，暗电流主要来自热电子发射。一般灵敏区达到长波（800nm）的光电倍增管的暗电流也大，没有特别的需要最好不用这种光电倍增管。

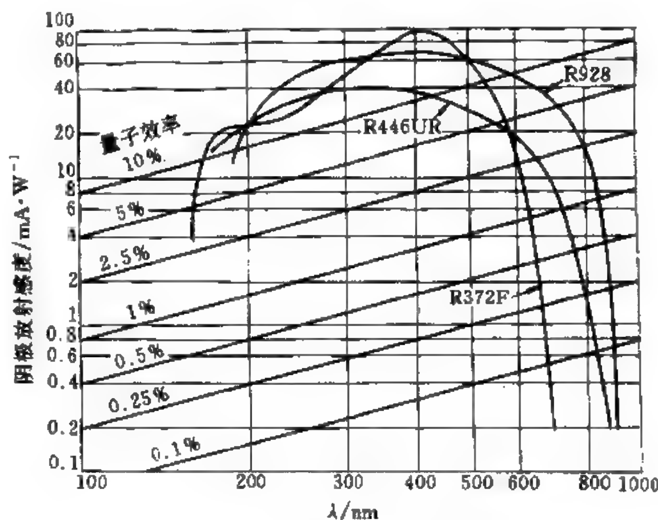


图 22-12 光电倍增管的光电特性
阴极发射灵敏度：以光能为刻度的灵敏度
量子效率：以光子数为刻度的灵敏度

（五）读出装置

计算机控制的荧光分光光度计，可使用荧光屏显示终端、绘图仪绘图和打印机打印中的任何一种读出装置。

二、荧光分光光度计[23—26]

随着微型计算机的普及，荧光分光光度计也有了很大发展。荧光分光光度计由高能量光学系统和微机主控部件组成（见图 22-13 和图 22-14）。荧光分光光度计的数据处理系统有的采用专用微机数据处理器（如岛津 RF-5000），更多的采用个人计算机 IBM PC/AT 或其 100% 兼容机（如岛津 RF-5301、日立 F-4500 和 PE LS-50B）。仪器的操作指令可以通过键盘命令控制，有很多操作可用鼠标控制器轻而易举地完成（Windows 环境下主要依赖鼠标）。新型的荧光分光光度计能测定荧光、磷光、化学发光和生物发光，适用于气体、液体、浑浊体和固体样品的测定。国外几家有代表性公司的荧光分光光度计（如日立、岛津、PE 公司），仪器一般都具有如下几个功能：

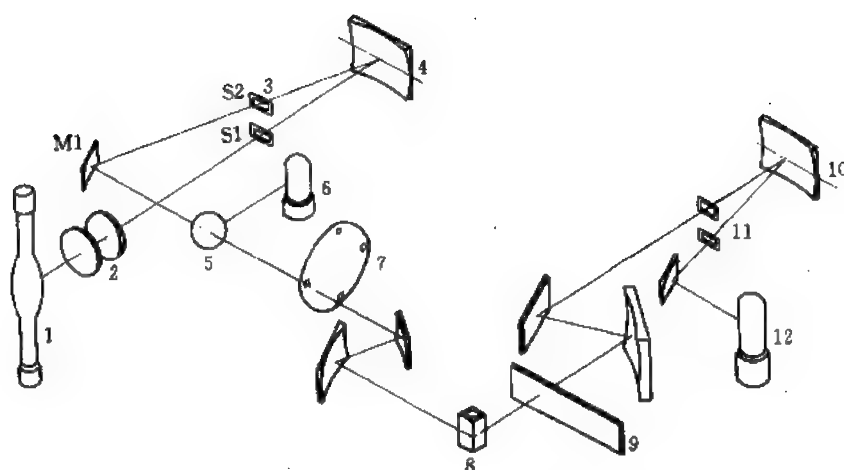


图 22-13 日立 F-4500 型荧光分光光度计光学系统示意图

1—150W 氙灯；2——组透镜；3、11—水平狭缝；4、10—单色器光栅；5—光束分裂器；6—参考光电管；7—光闸；8—样品池；9—样品室光闸；12—R-3788 光电倍增管

（1）测定功能 激发光谱、发射光谱、同步光谱、时间扫描、定量分析（强度测量）测定功能包括：重复测量；自动搜索最佳激发波长；最佳发射波长；单、双、叁波长测量等。

（2）数据处理功能 数据处理功能包括：数学计算（＋、－、×、÷），平滑，导数光谱（1～4 阶），标度扩展与缩小，峰检测和读出，速率计算，数据读出，数据打印输出，工作曲线制备，1、2 和 3 次方程拟合以及折线工作曲线，工作曲线校正，统计计算，平均计算，面积积分，时间积分等。

（3）文件功能 文件功能包括：数据的存贮、调用、删除，本机文件格式转换为 ASC Ⅱ 格式等。

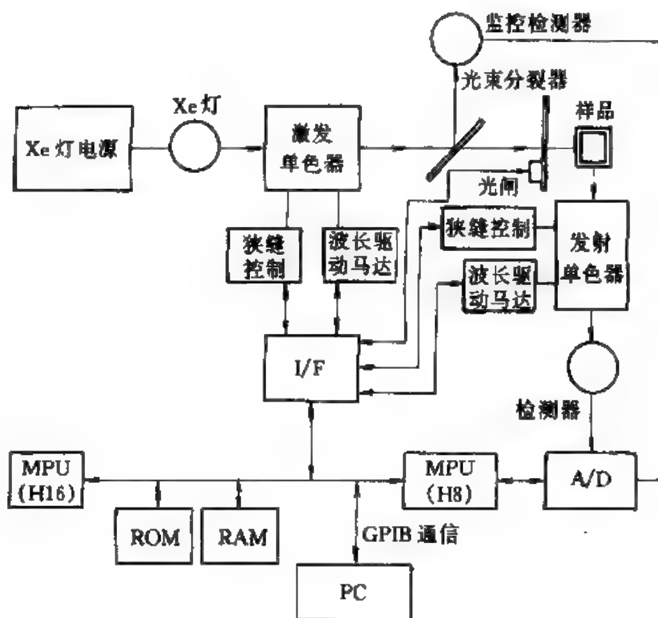


图 22-14 日立 F-4500 型荧光分光光度计的方块图

（4）显示和记录功能 显示和记录功能包括：标度自动调节，数据读出，数据打印输出，现行工作曲线颜色，线形的改变等。

另外，日立 F-4500 及 PE LS-50B 还具有三维测量，磷光延迟时间曲线测量，磷光寿命计算功能等。PE 公司的 LS-50B 可进行人体中细胞内钙离子快、慢速测定，人体内血流量的测定，人体内铝的全自动分析，酶的分析等功能等。

三、激发、荧光光谱的校正和荧光仪器的灵敏度

使用一般仪器获得的激发光谱和荧光光谱都是表观激发光谱和表观荧光光谱，其中包含着有关光源、单色器和检出器等性能常数的因素，并不是真实的激发和荧光光谱。既使是测定同一物质的激发光谱和荧光光谱，使用不同的仪器所得的最大波长和波形也常常有所不同，为了获得真实的光谱，必须对仪器的性能常数加以校正。

以定量测定为目的考察测定条件和一般分析工作，用表观的激发光谱和荧光光谱或相对值就可以了。但研究荧光物质的荧光特性，或者与其他研究者的结果作比较时，必须使用真实的光谱。给出谱图时最好标出使用的仪器、激发光源、液池长度、该物质的摩尔吸光系数、测定温度、狭缝宽度、量子产额等参数，以便根据这些参数来比较灵敏度。

（一）激发光谱的校正

激发光谱的失真主要由激发光源和激发单色器的光谱特性造成，可以用能够测量激发光光量子数的光量计校正，也可以比较标准荧光物质的表观激发光谱和吸收光谱的方法校正，还可以用光量计-微机校正法校正。

1. 光量计校正

罗丹明B乙醇溶液（$3g \cdot L^{-1}$）是一种常用的光量子计它在波长200～600nm区能全部吸收入射光，且荧光量子产额及发射的最大波长（630nm）基本上与激发波长无关，其荧光强度理应与激发光的光量子数成正比，但实际并非如此。罗丹明B的激发光谱等于罗丹明B特性、光源特性和激发单色器特性三项因素的乘积。在测定目的试样的激发光谱之后，以10nm的间隔将测出的强度换算成与罗丹明B激发光谱对应波长强度的比值，即可求出目的成分的校正激发光谱。

2. 光量子计-程序电位计法

将激发光分出一路引入罗丹明B溶液的光量子计。将罗丹明B溶液装人三角液池，用监控光电倍增管接受激发光完全吸收后产生的荧光，产生的电信号经放大作为比较的基准。经过与基准信号比较之后记录试样的激发光谱，所得到的激发光谱就是真实的激发光谱。

3. 光量子计-微机校正法

把盛有罗丹明B的石英三角液池光量子计置人样品室，在发射单色器的人口处插人一红色滤光片并调节波长至630nm，扫描激发单色器，所检测到的信号送入微机贮存和归一化处理，经微机处理后的信号为一条直线。取走光量子计和红色滤光片，置入分析样品，测定分析样品的激发光谱，即为校正过的激发光谱。

（二）荧光光谱的校正

1. 微机-散射光法

校正激发光谱之后，把散射光板插入样品室，进行激发。发射单色器同波长的同步扫描，把扫描获得的信号输送给微机贮存和归一化处理，输出信号为一条与波长无关的直线。然后扫描得到的样品的发射光谱即为样品校正的发射光谱。

2. 程序电位器-散射光法

在试样室位置装上氧化镁散射板，进行同波长同步扫描，调节电位器，使记录得到的信号为与波长无关的直线。

3. 使用标准灯的校正方法

缺少自动校正发射光谱的荧光分光光度计时，可用此法。标准灯的光谱为单色器特性、检

测器特性和标准灯特性三项因素的乘积。用标准灯的能量去除所得光谱，商值为校正系数。测出试样的表观荧光光谱之后，在对应波长位置求出与校正系数的比值，这种比值用图形表示出来就是校正的荧光光谱。

（三）荧光仪器的灵敏度

表示荧光仪器的灵敏度，应标明仪器参数。

1. 以奎宁检出限表示

奎宁（0.05mol・$L^{-1}H_2SO_4$）的荧光峰在450nm。当奎宁溶液浓度很小时（例如0.05ng・ml^{-1}），溶剂中拉曼峰的拖尾对奎宁的信号干扰已相当明显，奎宁信号的噪音也已相当显著。因此，人们常以此时奎宁信号对仪器噪音比的奎宁浓度作为该仪器的检测灵敏度，见图22-15。

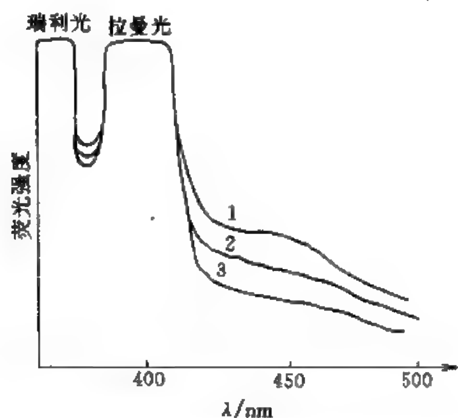


图22-15　以奎宁检出限表示荧光仪器的灵敏度

$\lambda_{ex}=350nm$

1—0.10μg・L^{-1}奎宁；2—0.05μg・L^{-1}奎宁；3—0.05mol・$L^{-1}H_2SO_4$

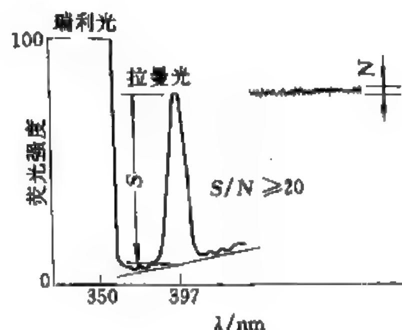


图22-16　以水拉曼光信噪比表示荧光仪器的灵敏度

$\lambda_{ex}=350nm$

2. 以水的拉曼光信噪比表示

纯水易得，它用同一波长光线激发所产生的拉曼光波长也一样，便于测试。用纯水的拉曼光信噪比所表示仪器的灵敏度见图22-16。

参考文献

1　陈国珍，黄贤智，许金钩等编．荧光分析法．第二版．北京：科学出版社，1990
2　郑永章译．分析化学译刊，1987；4(5—6)：145
3　陆志刚译．光化学原理．北京：人民教育出版社．1982
4　王国文编．原子与分子光谱导论．北京：北京大学出版社，1985．97页
5　李隆弟，张　满．分析化学，1988；16(8)：732
6　綦云祥，贾　欣．分析化学，1986；14(8)：616
7　李隆弟，郑用熙．分析化学，1985；13(7)：548
8　方瑞斌，徐其亨．化学试剂，1986；8(5)：278
9　李志良，石乐明，李梦龙等．分析化学，1990；18(8)：780
10　章竹君，吕九如．分析试验室．1991；10(4)：102
11　刘长松，魏雁声，晋卫军．分析试验室，1995；14(4)：86
12　曹秋娥，徐其亨．化学试剂，1993；15(5)：287
13　文志明．中国环境监测，1992；8(2)：45
14　祝大昌，陈剑铉，朱世盛译．分子发光分析法（荧光法和磷光法）．上海：复旦大学出版社，1985
15　史慧明，唐　波，王　宁等．化学试剂，1993；15(6)：321
16　赵建为，徐其亨．化学试剂，1992；14(6)：346

17 赵建为，徐其亨，文 萍．化学试剂，1993；15(2)：89
18 方国桢，郭忠先．化学试剂，1993；15(6)：353
19 符连社，任 英．化学试剂，1994；16(3)：161
20 曾云鹗，张华山，陈震华编．现代化学试剂手册(第四分册)．北京：化学工业出版社，1989
21 中国医药公司上海化学试剂采购供应站编．试剂手册．第二版．上海：上海科学技术出版社，1985
22 徐文韬，王熙煜译．有机化合物结构式手册（中、英、日名称对照）．石家庄：河北教育出版社，1987
23 张新明．国外分析仪器技术与应用，1986；(3)：41
24 岛津(SHIMADZU)公司荧光分光光度计样本说明书
25 日立(HITACHI)公司荧光分光光度计样本说明书
26 珀金-埃尔莫(PERKIN-ELMER)公司荧光分光光度计样本说明书

第二十三章　荧光分析方法及其应用

目前除了采用常规荧光分析方法外，发展了各种荧光分析技术，本章对各种分析技术作扼要介绍，此外还包括无机物的荧光分析和有机物荧光分析两大部分。

第一节　荧光分析方法[1]

一、常规荧光分析法

进行常规的荧光定量分析时，荧光强度必须与测定成份的浓度成正比，并具有良好的重现性，一般采用工作曲线法。首先用一稳定的荧光物质（荧光塑料板或某种荧光基准物质如硫酸奎宁的溶液），并设定仪器的工作条件，即校正仪器读数，使不同时间测得的工作曲线先后一致。然后测定已知浓度的标准溶液系列的荧光强度，以荧光强度对标准溶液浓度绘制工作曲线。最后由测得的试样溶液的荧光强度对照工作曲线，求出分析物质的浓度。定量分析中应使用工作曲线的直线部分。

荧光分析中，荧光强度必须真实地反映待测荧光物质的浓度，应当扣除溶剂和其他荧光杂质的荧光强度，即扣除空白溶液的值。根据样品实际情况，可选择溶剂空白、试剂空白或仅猝灭了分析物质荧光后的试样溶液空白。

对于多组分混合物的荧光分析，根据混合物中各组分的光谱特征，选择不同的分析方法。几种分析方法简述如下：

（一）激发或发射光谱不重叠

选择荧光测定的激发波长和发射波长两种参数。只要混合物中各组分激发或发射光谱差别显著，不重叠，即可选择不同的激发或发射波长进行分别测定。

（二）激发或发射光谱部分重叠

利用稀溶液中，荧光强度值具有加和性的原理，有 n 种分析物质，即选择 n 个合适波长，列出 n 个方程式，和吸光光度法一样，通过解联立方程式的办法达到分别测定的目的。

（三）多波长荧光法

对于同时测定的发射光谱相互重叠的双组分或三组分荧光混合物在合适条件下，可采用多波长荧光法。例如，荧光黄、罗丹明 6G、和罗丹明 B 三组分混合物的测定可见图 23-1、图 23-2 和图 23-3。由上面三个图可知，在 502 nm 波长处直接测定荧光黄，而罗丹明 6G 和罗丹明 B 的实际荧光强度由公式（23-1）和公式（23-2）算出，最后由荧光黄、罗丹明 B、罗丹明 6G 工作曲线求出各自含量。

$$F_{555}^{\text{罗丹明6G}}=F_{555}^{\text{总}}-F_{502}^{\text{荧光黄}}-F_{660}^{\text{罗丹明6G+罗丹明B}} \tag{23-1}$$

$$F_{585}^{\text{罗丹明B}}=F_{585}^{\text{总}}-F_{494}^{\text{荧光黄}}-F_{538}^{\text{罗丹明6G+荧光黄}}+F_{508}^{\text{荧光黄}} \tag{23-2}$$

（四）其他方法

根据试样溶液的具体情况，还可以分别利用改变 pH 值、加人掩蔽剂、及萃取等方法达到测定的目的。

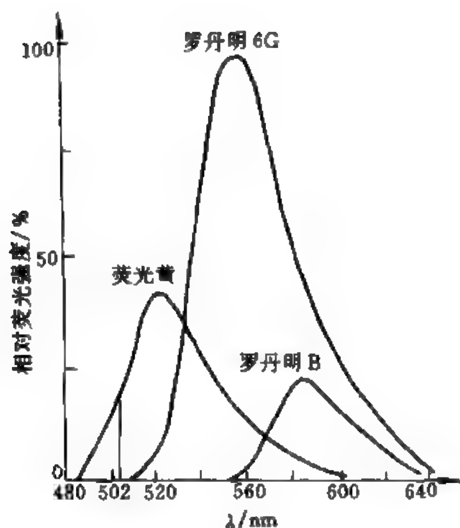


图 23-1 荧光黄、罗丹明 6G 和罗丹明 B 的荧光发射光谱

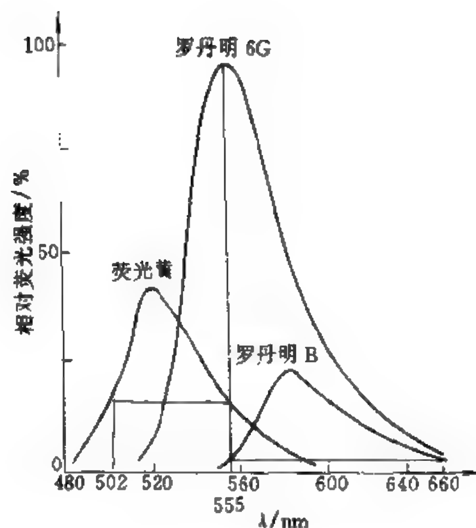


图 23-2 测定罗丹明 6G 时波长对的选择

λ_1=555nm；λ_2=502nm；λ_3=660nm

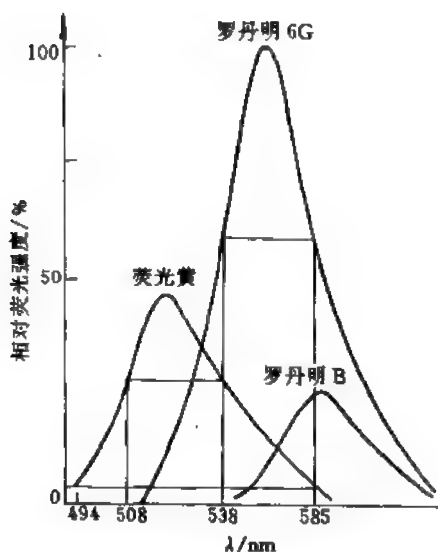


图 23-3 测定罗丹明 B 时波长对的选择

λ_1=585nm；λ_2=538nm；

λ_3=494nm；λ_4=508nm

二、同步荧光分析法[2]

同步荧光分析是同时扫描激发和发射波长，由测得的荧光强度信号与对应的激发波长（或发射波长）构成光谱图。同步荧光分析法具有谱图简化、谱带窄化、选择性提高、散射光干扰减少等特点，是解决多组分荧光物质同时测定的良好手段之一。同步荧光分析有以下三种类型。

（一）固定波长同步荧光法

该法在扫描过程中，激发波长和发射波长两者之间始终保持固定的波长间隔。由于同步荧光信号同时是激发波长和发射波长的函数，$\Delta\lambda=\lambda_{em}-\lambda_{ex}=$常数，可以表示为 λ_{em}或 λ_{ex}的函数。$\Delta\lambda$ 值的选择很重要，直接影响到同步荧光光谱的形状、带宽和信号强度，应通过实验加以选择。同步荧光光谱虽然简化，但只要激发光谱或发射光谱在需要的波长范围内有结构特征，所获得的同步荧光光谱在该光谱区便显现结构特征。丁省乙醇溶液及邻甲酚的激发光谱、发射光谱、同步荧光光谱见图 23-4 及图 23-5。由图可以看出，使用同步扫描技术，使谱带窄化。

（二）固定能量同步荧光法（CESLS）

该法是在激发波长和发射波长的同时扫描过程中，保持二者具有固定的能量差，也即维持一恒定的波数差 $\Delta\sigma$ 关系：

$$\Delta\sigma=\left(\frac{1}{\lambda_{ex}}-\frac{1}{\lambda_{em}}\right)\times10^7 \tag{23-3}$$

式中，λ_{ex}、λ_{em}分别为激发和发射波长，单位 nm；$\Delta\sigma$ 单位为 cm^{-1}。据此测得的荧光信号对相应波长（或频率）作图，所得的谱图即为固定能量同步荧光光谱。固定能量同步荧光法以荧光体的量子振动跃迁的特征能量为依据而进行同步扫描。若选择一固定能量差 $\Delta\sigma$ 等于某一振动能量差，则在同步扫描中，当激发能量和发射能量刚好匹配一特定吸收-发射跃迁条件时，该跃迁处于最佳条件，由此产生的同步光谱可达最大强度。选择合适的 $\Delta\sigma$ 能得到极为简单的单峰到类似于常规荧光光谱的多峰。CESLS 在克服拉曼光，提高分析灵敏度方面有显著效果，主要应用于多核芳烃的分析。

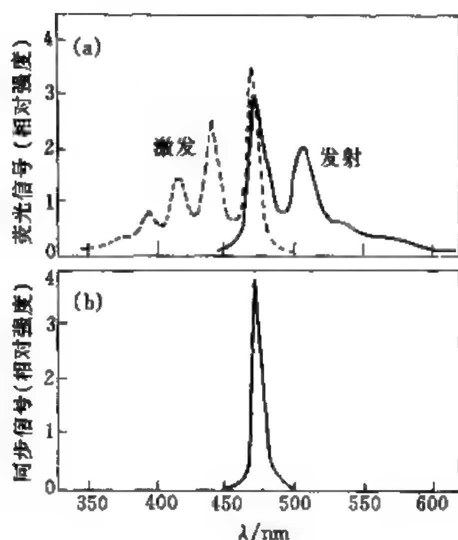


图 23-4　丁省的荧光发射光谱、激发光谱及同步荧光光谱

(a) 荧光发射光谱与激发光谱；

(b) 同步荧光光谱（$\Delta\lambda=3$nm）

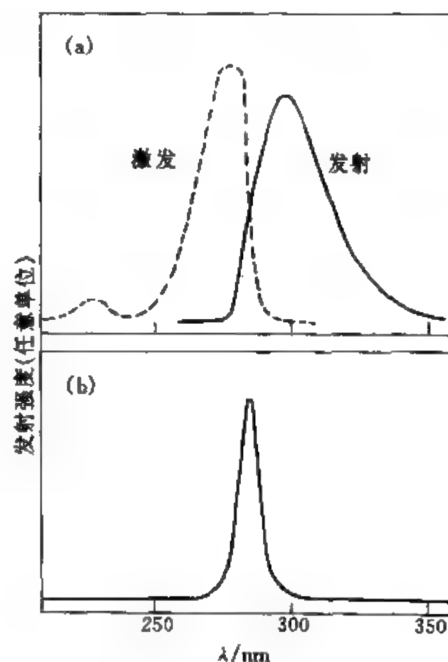


图 23-5　邻甲酚的荧光激发光谱、发射光谱及同步荧光光谱

(a) 荧光激发光谱与发射光谱；

(b) 同步荧光光谱

（三）可变角同步荧光法

可变角同步荧光法是让激发单色仪和发射单色仪分别以恒定而不同的速度同时进行扫描，从而使波长差 $\Delta\lambda$ 对于波长呈线性变化，所得的谱图即称为可变角同步荧光光谱。该法具有更大的波长选择灵活性，因此，选择扫描参数是关键问题。

三、三维荧光光谱技术

物质的荧光强度 F 与激发光的波长和所测量发射光的波长有关，将 F 的数据用矩阵形式表示，行和列对应不同的激发光波长和发射光波长，每个矩阵元分别为该激发光、发射光波长的荧光强度 F，称之为激发-发射矩阵，简称 EEM。描述荧光强度及同时随激发波长和发射波长变化的关系图谱即为三维荧光光谱。三维荧光光谱有两种表示形式。

（一）等角三维投影图

等角三维投影图是一种直观的三维立体投影图（见图 23-6），空间坐标 x、y、z 轴分别表示发射波长、激发波长、荧光强度。从图上容易观察到荧光峰的位置和高度以及荧光光谱的某些特性，可作为一种有价值的光谱指纹技术。

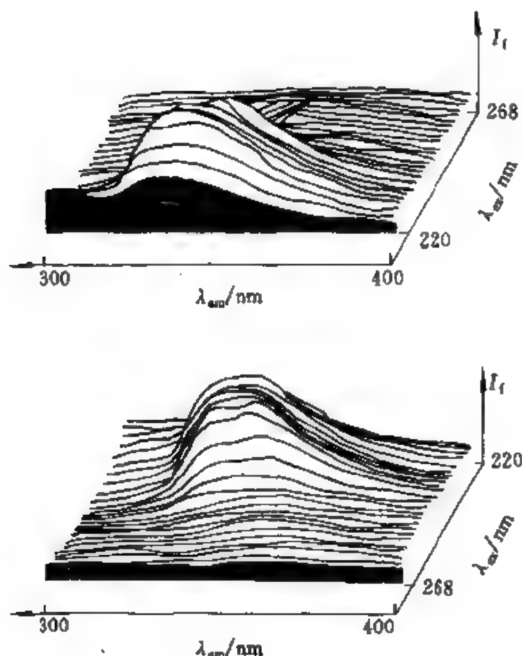


图 23-6 原油试样在环己烷中的等角三维投影光谱图

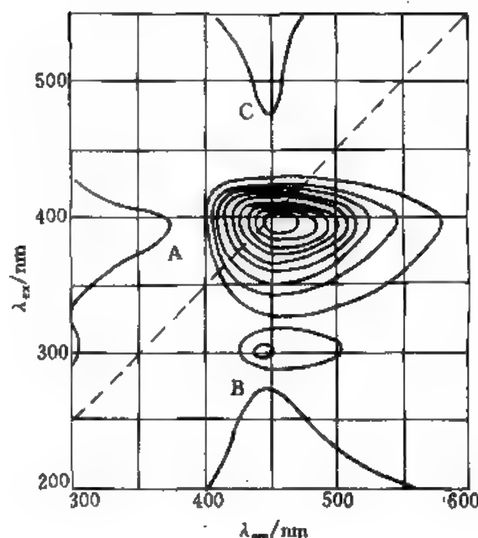


图 23-7 7-羟基苯并[a]芘荧光谱图

（二）等高线光谱图

以平面坐标的横轴表示发射波长，纵轴表示激发波长，平面上的点即表示由两个波长所决定的样品的荧光强度。将荧光强度相等的各个点连结起来，便在 $\lambda_{em}-\lambda_{ex}$ 构成的平面上显示了由一系列等强度线组成的等高线光谱（见图 23-7）。从图 23-7 可以看出，激发光谱 A 是三维谱图在沿 $\lambda_{em}=$ 440nm 的剖面上的轮廓线，发射光谱 B 是沿 $\lambda_{ex}=$ 390nm 的剖面上的轮廓线，曲线 C 是 $\Delta\lambda=50$nm 的同步扫描荧光光谱，一级瑞利散射则是沿 $\lambda_{ex}=\lambda_{em}$ 的 45°对角线切割并投影在发射波长轴上的轮廓线。

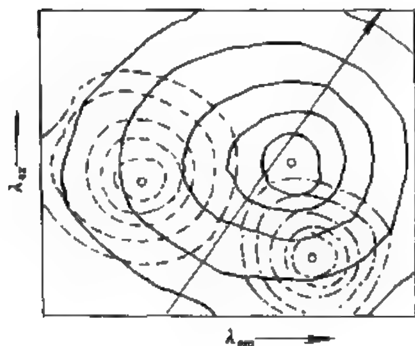


图 23-8 用可变角同步扫描荧光测定法研究三种荧光团的混合物
连续等高线代表待分析的物质；非连续的等高线代表干扰组分

从混合物体系的三维荧光光谱，可以确定同步扫描时所对应选择的合理 $\Delta\lambda$ 值和可变角，如图 23-8 所示，图中的直线（非 45°剖线）是可变角同步扫描，具有良好的选择性。

另外，EEM 作为时间、温度、pH 值等的函数所得到的三维数据，对于分析复杂混合物也是有力的手段。

四、导数荧光测定

记录荧光强度对波长的一阶导数或更高阶的导数，便获得相应的导数荧光光谱。如以荧

光强度随波长改变的速率（即一阶导数 $dF/d\lambda$）为纵坐标、波长（λ）为横坐标所记录的荧光光谱，即为一阶导数荧光光谱。以此类推，纵坐标为 $d^2F/d\lambda^2$ 时，即为二阶导数荧光光谱。在导数荧光测定中，在一定条件下，分析物的浓度与测定波长下荧光强度对波长的导数值成正比。如图 23-9 所示，其求值方法有基线法（或正切法），即测量中间极值至切线的距离 d；峰距法，即测量相邻的峰谷之间的距离（如 p_1 或 p_2）；峰零法，即测量峰至零线之间的距离 z。

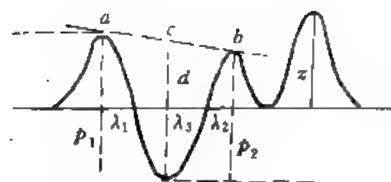


图 23-9　导数光谱的求值

导数技术具有能增强特征光谱精细结构的分辨能力、减小光谱干扰、特别是背景的干扰等优点。

五、时间分辨荧光测定[3~6]

荧光寿命通常指分子在返回到基态之前停留在激发态的平均时间，荧光寿命是荧光分子的一个特征参数。时间分辨荧光测定引入了第三个参数——荧光寿命，荧光强度可表示为 F（λ_{ex}、λ_{em}、τ），根据荧光分子衰变时间特征而进行选择测定的方法称为时间分辨荧光测定。当两种荧光物质的荧光寿命相差很大时［对于纳秒时间分辨荧光约需（3～4）ns 的寿命差］，通过延迟一定时间，使短寿命荧光信号衰变完全后再采样，从而消除短寿命信号的干扰。也就是说，既可消除瑞利和拉曼散射的干扰，又可利用荧光寿命差异对荧光光谱重叠组分进行测定。随着激光器件的发展，以激光器为光源，时间分辨的下限已达 10^{-15}s 数量级。

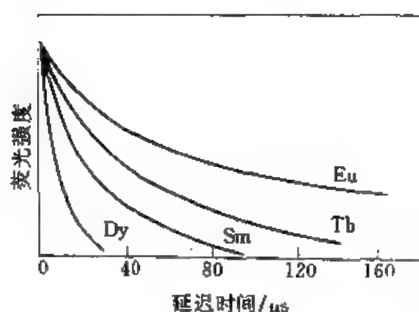


图 23-10　荧光衰变曲线

一般荧光曲线是以单指数形式衰减。图 23-10 为稀土离子 RE（Ⅲ）（RE＝Dy、Eu、Sm 和 Tb）与 TFA、TOPO 形成的配合物的荧光衰变特性曲线。Dy（Ⅲ）、Eu（Ⅲ）、Sm（Ⅲ）和 Tb（Ⅲ）的荧光寿命分别为 5.0μs、480μs、35μs、45μs，当延迟时间为 20μs 时，基本上可消除 Dy 对 Eu 和 Tb 的干扰。图 23-11 给出了 0.5×10^{-14}mol・L^{-1}Al $(C_9H_6ON)_3$ 和 2.5×10^{-14}mol・L^{-1}In $(C_9H_6ON)_3$ 的混合物三氯甲烷溶液的衰减曲线。在（35～50）ns 区间服从于 Al$(C_9H_6ON)_3$ 的衰减特性（τ＝17.8ns），在（20～30）ns 区间的衰减取决于In $(C_9H_6ON)_3$短寿命荧光的衰减。从混合体系的衰减曲线上扣除长寿命成分（Al）的荧光强度，即可得到短寿命成分 In$(C_9H_6ON)_3$ 的衰减特性曲线。在同样条件下分别测定各单独成分的已知浓度标准溶液的衰减特性曲线，然后将混合体系中各成分的荧光强度计算值与标准溶液的荧光强度相比，即可得出混合体系中各成分的含量。

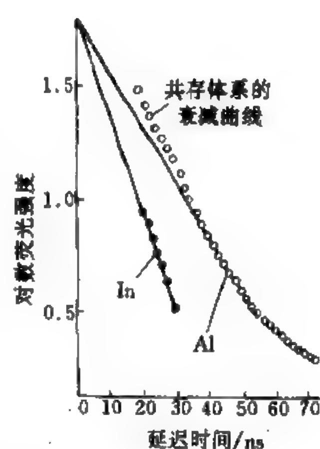


图 23-11　两种混合成分体系的荧光衰减曲线

六、相分辨荧光测定[7,8]

上述的脉冲测定法，即时间分辨衰减测定荧光寿命，需要相当长的数据采集时间，对短促荧光寿命不能获得好的测定结果。相分辨测定法是荧光寿命测量的另外一种方法，它易于测定短促的（ns）荧光寿命，相位和调制测定是快速的，只需几秒钟就可获得数据。

在相分辨法中，试样用已被正弦调制过光强度的光激发。因为荧光发射是激发光推动的响应，所以产生荧光也被以同样的角调制频率 ω 调制。如果荧光寿命为零，经过调制的激发光和荧光的相位没有变化；如荧光寿命不为零时，被调制的荧光发射相对于激发光在相位上滞后一个角度 θ，而且荧光发射的调制度小于激发光的调制度（m_L），即发射光的改变部分的相对幅度（如图 23-12 中 B/A）比起激发光的（图中 b/a）小些，其比值称为去调制因素 m（图中$\frac{B/A}{b/a}=Ba/Ab$）。

对于单指数衰变的荧光，纯荧光体在流体均匀的环境中大多是这样，荧光寿命 τ、相角 θ、角调制频率 ω 以及去调制因素 m 的关系如下：

$$\tan\theta=\omega\tau \tag{23-4}$$

$$m=\cos\theta=[1+(\omega\tau)^2]^{-\frac{1}{2}} \tag{23-5}$$

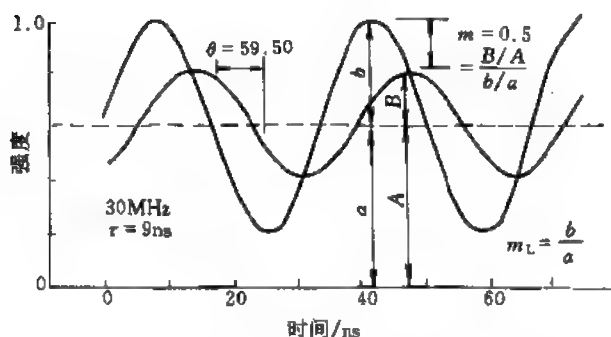


图 23-12　激发光和发射光的光强度正弦调制

从去调制因素 m（公式 23-5）求出荧光寿命 τ，误差很大。以相分辨法测荧光寿命时，一般采用以高频调制激发光测定激发光和荧光信号相角的方法。相分辨法的时间分辨能力很高，一般能得到 0.1ns 的分辨能力，用这种方法能高精度地测定数 ns 的荧光寿命。

若样品中含有两种或两种以上的荧光体，则荧光是双指数或多指数衰变。采用配备着相灵敏检测器的相荧光计，可简便地分辨不均匀的荧光。因为对于单一化合物，其荧光峰波长基本上保持不变，而与检测器相角无关。若是不均匀的发射，则荧光峰随着检测器相角而改变。从公式 23-4 也可以看出，若是均匀的发射，整个荧光发射光谱区内具有一个恒定的荧光寿命值，θ 角不改变。采用相灵敏检测技术，还可在两种荧光物的混合物中直接分别记录下每种荧光物的光谱。

假设样品溶液中含有 A、B 两种荧光体，它们的荧光寿命分别为 τ_A和 τ_B 而不相等，用相灵敏检测器可以得到调制发射，其信号为

$$F(\lambda,\theta_D)=F_A(\lambda)m_A\cos(\theta_D-\theta_A)+F_B(\lambda)m_B\cos(\theta_D-\theta_B) \tag{23-6}$$

式中，F_A（λ）和 F_B（λ）分别为组分 A 和组分 B 在稳态光谱中于波长 λ 的荧光强度。如果把检测器相角调节到和一种给定组分正交，即$|\theta_i-\theta_D|=90°$，则该组分的发射将被抑制，而波长扫描所测得的相灵敏光谱只是另一组分的稳态光谱，但强度将减弱至原强度的 $\sin(\theta_B-\theta_A)$。

七、荧光偏振测定[9~11]

当荧光分子溶液受到偏振光激发时，产生的荧光往往也是偏振光，如图 23-13 和图 23-14

所示。

一般用$I_{\parallel}$表示平行于激发光振动方向的荧光强度，$I_{\perp}$表示垂直于激发光振动方向的荧光强度，荧光偏振度p和各向异性r定义为

$$p=\frac{I_{\parallel}-I_{\perp}G}{I_{\parallel}+I_{\perp}G} \tag{23-7}$$

$$r=\frac{I_{\parallel}-I_{\perp}G}{I_{\parallel}+2I_{\perp}G} \tag{23-8}$$

式中，校正因子G是平行与垂直两种偏振光的透射率之比，随仪器和波长变化。对于完全偏振光$I_{\perp}=0$，$p=r=1.0$；非偏振光$I_{\parallel}=I_{\perp}$，$p=r=0$。激发光波长（或荧光发射波长）与荧光偏振度p的对应曲线叫做荧光偏振光谱。由于溶液中的荧光体被激发时存在着光选择性，p和r最大值分别为0.5和0.4。由于荧光体的吸收矩和发射矩并非共线，存在平均角移α，加上荧光体的光选择性，偏振度p和各向异性r为

$$p=\frac{3\cos^2\alpha-1}{\cos^2\alpha+3} \tag{23-9}$$

$$r=\frac{3\cos^2\alpha-1}{5} \tag{23-10}$$

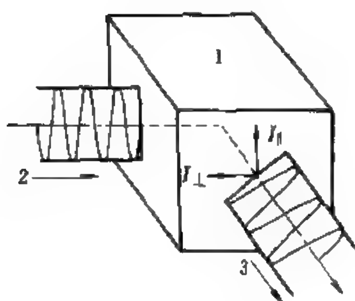


图 23-13　荧光偏光原理

1—试样；2—激发光；3—荧光

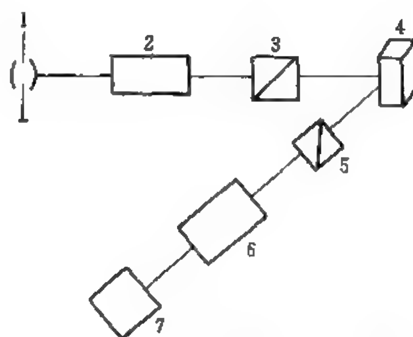


图 23-14　荧光偏振分光计光路示意图

1—光源；2—激发单色器；3—起偏器；4—液池；5—检偏器；6—发射单色器；7—检测器

由实践得知，α值与激发光波长有关而与发射波长无关。在一定波长的偏振光激发下，不同的荧光体的发射区会出现一偏振值不同的平台区，据此可辨别不同的荧光体。荧光体的偏振值与荧光发射波长无关，若荧光偏振发射谱有差异，也意味有不同状态的荧光体。

在很稀的溶液中，假设不存在分子间的能量转移，在吸收激发光和发射荧光之间的时间间隔内分子的转动扩散，使受激态分子的取向随机化。因而降低荧光的偏振度（称为消偏），当用Perrin-Weber方程来描述其消偏振的状况，有以下几种表达式

$$\frac{1}{P}-\frac{1}{3}=\left(\frac{1}{P_0}-\frac{1}{3}\right)\left(1+\frac{R_gT\tau}{\eta V}\right) \tag{23-11}$$

$$\frac{1}{P}-\frac{1}{3}=\left(\frac{1}{P_0}-\frac{1}{3}\right)\left(1+6R\tau\right) \tag{23-12}$$

$$\frac{1}{P}-\frac{1}{3}=\left(\frac{1}{P_0}-\frac{1}{3}\right)\left(1+\frac{3\tau}{\rho_h}\right) \tag{23-13}$$

$$\frac{r_0}{r}=1+\frac{R_gT}{\eta V}\tau \tag{23-14}$$

式中，R_g 为气体常数；T 为热力学温度；V 为转动荧光体的体积；η 为粘度；R 为荧光体的转动速度；ρ_h 为被研究物质的平均谐波转动弛豫时间；τ 为荧光寿命；P 为偏振度；P_0 为不存在布朗运动时的最大偏振度；r 为各向异性值；r_0 为不存在转动和能量转移消偏时的各向异性值。

脉冲偏振光和稳态偏振光一样，可用来探测荧光体的结构变化。当用一极短的脉冲光激发一对称的理想荧光体（各向同性）时，其荧光强度 $I(t)$ 和荧光各向异性 $r(t)$ 均为一单指数的衰减过程，即

$$r(t)=r_0\exp(-t/\Phi)=r_0\exp(-6Rt) \quad (23\text{-}15)$$

$$I(t)=I_0\exp(-t/\tau) \quad (23\text{-}16)$$

式中，t 为时间；Φ 为转动相关时间，$\Phi=\eta V/R_gT=1/6R$，$I=I_{\parallel}+2I_{\perp}$。

当荧光体的转动受到约束时，r 值并不衰减为零，而是衰减至一极限值 r_∞，受约束分子的 $r(t)$ 可近似描述为

$$r(t)=(r_0-r_\infty)\exp(-6Rt)+r_\infty \quad (23\text{-}17)$$

八、荧光免疫测定[12~18]

（一）原理

脊椎动物的免疫系统能抵御外来的入侵物质，诸如病毒、细菌以及其他机体的细胞。当称为抗原（Ag）的外来物质（通常也是蛋白质）入侵后，免疫系统对此作出反应所产生和解释的蛋白质叫做抗体（Ab）。每一种抗体对于相应的一特定抗原具有高度的专一性，抗体与抗原结合形成一种抗体-抗原复合物（Ag-Ab），于是入侵物质失活从而被排出体外。低分子量（$M<1000$）的有机化合物，如药物等，其本身不具有免疫应答能力，但可诱导并获得抗体。一个小分子如果被偶联到载体蛋白上，被免疫后就能引发出针对这种小分子半抗原的抗体。常用的载体是牛血清白蛋白（BSA）和血蓝蛋白（HA）。

荧光免疫分析（FIA）是以荧光化合物作为抗原或抗体的标记物（或称荧光探针），将免疫反应与荧光测定结合起来的分析方法。例如，固定抗体 Ab 和已标记的抗原 AgL 的浓度，加入未标记的抗原 Ag（样品或标准溶液），保证抗原处于过量，则混合物中建立如下的平衡：



$$\mathrm{AgL+Ag+Ab \rightleftharpoons AgL\text{-}Ab+Ag\text{-}Ab}$$

AgL-Ab 复合物的浓度或 AgL 的浓度与加入的未标记抗原浓度有关，从而可测定抗原。FIA 兼具荧光分析的高灵敏度和免疫分析的专一性。

（二）荧光探针

在荧光免疫分析中荧光标记物或荧光探针的选择很关键，对荧光探针的要求是：①有高的荧光强度（包括激发的吸收和量子产率）；②荧光信号与背景应有明显的区别，探针试剂的荧光发射波长应大于 500nm，stokes 位移应大于 50nm；③其与抗体（或抗原）的结合不能对抗体（或抗原）有不利的影响；④易溶于水；⑤形成的结合物在贮存或测定时稳定性好。

在 FIA 中已广泛应用异硫氰酸荧光素及其衍生物、罗丹明类衍生物等作为标记物。另外一些生物大分子，如藻胆蛋白、卟啉类和叶绿素等，由于其 Stokes 位移大，有利于排除干扰，也作为探针标记抗原（或抗体）。一些用于荧光免疫检测的荧光探针的性质见表 23-1。有机荧光探针的结构及分析用途见表 23-2。

作为荧光探针的镧系离子（尤其是 Eu^{3+} 和 Tb^{3+}）螯合物，已使荧光免疫分析的荧光探针由单纯的有机分子标记物发展到金属离子螯合物，由于镧系离子螯合物高强度的荧光发射及

荧光寿命长的特点，已建立了时间分辨荧光免疫分析法（TrFIA）。国外已生产的 TrFIA 试剂盒见表 23-3，铕标记荧光免疫测定药盒见表 23-4。稀土离子不能直接稳定地接到抗原或抗体上，必须通过一种很强的双功能螯合剂（如 EDTA 衍生物）才能实现。这种双功能螯合剂的一端与稀土离子螯合，另一端与抗原或抗体上的氨基偶联。标记方法分为螯合剂先螯合 Eu^{3+}，再联接抗原或抗体（一步法）；或者先联接抗原或抗体，再螯合 Eu^{3+}（两步法）两种。

当镧系离子标记的抗体（或抗原）与待测抗原（或抗体）结合成免疫复合物后在高 pH（pH=7～9）溶液中发光极弱，若在低 pH（pH=2～3）时，镧系离子很容易从免疫复合物中解离出来。低 pH 的解离溶液称为增强剂，一般由 β-二酮螯合剂、三辛基氧化膦（TOPO）、乙酸以及 Triton X-100 组成。解离出来的镧系离子与增强剂中的某些成分形成一种新的螯合物，新的螯合物能发出高强度的荧光，且衰变的时间长(10～1000μs)。

（三）荧光免疫分析法的类型

1. 非均相荧光免疫分析法

非均相 FIA 需将抗原-抗体复合物与游离抗原（或抗体）分离，由于同时可与体液中部分杂质分离，故本底荧光值较低。

（1）非竞争法　第一种方法是，过量的标记抗原（或抗体）与待测的抗体（或抗原）反应后，利用某种方法沉淀抗原-抗体复合物。可以测定游离的抗原（或抗体）的荧光强度，也可测抗原-抗体沉淀的荧光强度。第二种方法是固相双位点夹心法，主要用于测定抗原。先将第一抗体吸附在固相载体上，加入样品，保温，洗涤干净，再加入已标记的第二抗体，形成固相抗体-抗原-标记抗体复合物，洗涤后用促进液显荧光进行测定。

（2）竞争法　吸附在固相载体上的抗体（或抗原），和游离的待测样品（或标准）中的抗体（或抗原）与一定量游离的标记的抗原（或抗体）竞争结合。

2. 均相荧光免疫分析法

均相 FIA 不需要分离，根据已标记抗原连接于抗体时发生已标记抗原荧光性质的改变，直接测定反应液的荧光值。此方法简单，但生物样品中蛋白质等所致的较高荧光本底值将使灵敏度受到一定限制。通常均相荧光检测法又可分为：①荧光偏振法；②荧光增强法；③荧光猝灭法；④间接猝灭法；⑤酶催水解法（底物标记荧光免疫法）；⑥荧光激发转移法等。

表 23-1　某些用于荧光免疫检测的荧光探针的性质[13]

探　　针	$\lambda_{abs/ex}$/nm	ε/(L·mol^{-1})	λ_{em}/nm	量子产率/%	τ/ns
荧光素(FITC,DTAF)	492	7×10^4	520	0.85	4.5
罗丹明类 RBITC	550	1.2×10^4	585	0.70	3.0
TMRITC	550	5.0×10^4	580		
RB200SC	530,565		595		1.0
伞形酮类	380	2.0×10^4	450		
DANS	340	3.4×10^3	480～520	0.30	14.0
ANS	385		471	0.80	16.0
荧光胺	394	6.3×10^3	475	0.10	7
MDPF	390	6.4×10^3	480	0.10	
芘衍生物①	340		375,392		100
Lueifer 黄 VS	430		540		
卟啉类	400～410		619～633		
叶绿素类	430～453	7×10^5	648～669		

续表

探　　针	$\lambda_{abs/ex}$/nm	ε/(L·mol^{-1})	λ_{em}/nm	量子产率/%	τ/ns
藻胆蛋白	530～620	2.4×10^6	580～660	0.5～0.98	
Eu-(β-NTA)$_3$	340	3×10^4	590～613		500000
Tb-EDTA-磺基水杨酸	300		490,545		

① N-(3-芘)-马来酰亚胺；NTA：萘酰三氟丙酮；DTAF：二氯三吖嗪基氨荧光素；MDPF：2-甲氧基-2,4 二苯基-3(2N)呋喃；DANS：丹磺酰氯；ANS：苯胺基萘磺酸；RBITC：罗丹明 B-异硫氰酸盐；TMRNITC：四甲基罗丹明异硫氰酸盐；RB200SC：丽丝胺罗丹明 B 磺酰氯。

表 23-2　有机荧光探针的结构及分析用途[20]

名　　称	用　　途
1-苯氨基萘	牛血清蛋白质结构的研究；表面活性剂的 C_{mc} 值
1-苯氨基萘-8-磺酸(1,8-ANS)及其铵盐	突触体移动膜的势能探针；血浆中不同密度的脂蛋白的测定；低密度脂蛋白的表面分析；溶血卵磷脂的 C_{mc} 值；红细胞膜的表面电荷；血迹检验；阳离子聚合过程的研究
2-对甲苯氨基萘-6-磺酸(2,6-TNS)及其钾盐	溶血卵磷脂的 C_{mc} 值表面活性物质的研究；血迹检验
2-二甲氨基-6-丙烯酰基萘	—SH 极敏感的探针
1-氯-2-取代氨基-6-烷基酰基萘	膜的动力学性质的研究
2,3-萘二甲醛	胍基化合物，含胍基的蛋白质
1,3-二萘丙烷	胆汁盐-卵磷脂基体探针
3-硝基-1,8-萘二甲酰氨	缺氧细胞的势能探针
3,4,5,6-四取代-1,8-萘二甲酰氨(取代基中至少有一个为—NO_2)	缺氧细胞的势能探针
3-硝基-1-萘氨	缺氧细胞的势能探针
羧酸-2-萘氨(萘酚脂类化合物)	水解酶
1,6-二苯基-1,3,5-己三烯	胆固醇的研究；红细胞膜中脂的流动性；大分子不饱和烷链卵磷脂的平衡和动力学结构的研究；聚丁二烯的流动性的研究；膜动力学的研究
1,8-二苯基-1,3,5,7-辛四烯	聚丁二烯的流动性研究；环氧树脂的陈化效应
1-(对二甲氨基苯)-6-苯基-1,3,5-己三烯	红细胞膜中脂的流动性；膜表面结构的研究；聚合过程
1-(对三甲铵基苯)-6-苯基-1,3,5-己三烯	脂双层结构的探针；卵磷脂的平衡和动力学结构
1-(对苯丙酸)-6-苯基-1,3,5-己三烯	阳离子膜和长链脂肪酸蛋白质的探针
对氨基苯亚丙腈类	固体聚合薄膜性质的测定；聚合物的陈化测定；环氧聚合物的陈化测定
对氨基苄脒	丝氨酸蛋白酶活性位置的测定
安息香	胍基化合物、含胍基的蛋白质
7-二甲氨基香豆素	牛血清蛋白
7-久尼香豆素类(在香豆素环的 1 或 5 位允许有甲基，在 3 位有羧酸衍生物或磺酸基取代)	蛋白质、核酸、抗体
4-甲基-7-(3-氯或溴代烷氧基)-香豆素	季铵
4-甲基-7-羟基香豆素	细胞内 pH 的测定
7-羟基香豆素酯	水解酶底物
4-甲基-7-二甲氨基-3-(对-N-马来酰亚氨基)香豆素	含—SH 键试剂的测定
β-羧酸蒽	活淋巴细胞的探针

名　　称	用　　途
蒽	膜和细胞的探针
9-叠氮蒽	脂肪酸的探针
9,10-二取代-β-蒽磺酸钠(取代基为—Br 或—Ph)	有机试剂的研究
9,10-二烷氧基蒽	聚烯烃的研究
4-(对二甲氨基苯乙烯基)-N-十二烷基吡啶镓盐	活淋巴细胞膜的结构的探测
4-(对二甲氨基苯乙烯基)-N-甲基吡啶盐	人类红细胞膜的结构的探针
4-(3,4-二烷基苯乙烯基)-N-取代基吡啶镓盐	生物膜的结构探针
4-取代-N-取代-3,5-二甲醛基吡啶镓	陈化染料探针
6 或 2-甲氧基-N-取代喹啉镓盐	测定膜中的 Cl^-
2-甲醛基-3-苯甲醛基喹啉	伯胺探针
2,3-二氯-1H-4-喹啉酮	分子结构、溶剂极性的探针
2,3-二苯基喹喔溴	亲核试剂、药物的探针
1-甲醛芘	糖和蛋白质相互作用的动力学研究
1-丁酸基芘	氧化还原体系及细胞膜结构的探针
8-羟基-1,3,5-芘三磺酸盐	脂质体中细胞内或细胞间脂肪的测定 溶液介质的探测
1,3-二羟基-5,9-芘二磺酸盐	蛋白质、核酸、抗体
6,8-二磺酰氯-1,4-二乙酰氧基芘	
1,4-芘二磺酸盐	
1-乙酰氧基-3,6,9-芘三磺酸盐	
α、ω-二芘基烷烃(烷基中碳原子个数可为 3,6,9)	细胞内微粘度的测定
芘	活淋巴细胞膜的结构测定；膜粘度探针
2-(对乙氨基苯)-4-氯-6-氨基苯并三唑	α-酸糖蛋白的研究探针
2-(对二烷基氨基苯)-4-烷基-6-氨基苯并三唑	蛋白质及蛋白质与药物结合的测定
2-(对取代苯)-5-氨基苯并三唑	人血清蛋白、蛋白质与药物结合的探针
4-(对甲氧基苯氨基)-7-硝基-2,1,3-苯并噁二唑	蛋白质的测定
4-取代氨基-7-硝基-2,1,3-苯并噁二唑	牛血清蛋白
4,7-二取代-2,1,3-苯并噁二唑	蛋白质基体中的—SH 及氨基酸化合物的分析
7-氟-4-磺酸-苯并呋喃	含二巯键的肽氨基酸探针
4-磺酸苯并呋喃	含—SH 的肽、蛋白质探针
2-(对烷氧基)-苯烯基苯并噻唑	脂肪酶活性测定的底物
2-氰基-6-羟基-苯并噻唑磷酸酯	烷基磷酸酯酶底物

续表

名　　称	用　　途	名　　称	用　　途
2-(对烷氧基苯烯基)苯并呋喃	脂肪酶活性测定底物	6-二碘乙酰氨基荧光素	未知基体蛋白质中的—SH的测定
1-取代-2-丙基-3硫乙基异吲哚 (取代基为) X N— -- N N— X X=Cl/F	雌激素探针	羧基荧光素及其衍生物	细胞内 pH 的测定
		4-苯甲酰基-1-苯酰氨基荧光素	腺嘌呤核苷酸在酶中的结合位置的测定
		二(羟乙基)荧光素	细胞内 pH 的测定
		2-硝基吖啶	缺氧细胞及还原体系的探针
		2-氨基吖啶	普通细胞,癌细胞的测定

表 23-3　国外已生产的 TR-FIA 试剂盒[15]

测定物质	最小检出值	标准曲线范围	测定物质	最小检出值	标准曲线范围
促甲状腺激素	0.03mIU · L^{-1}	(0.25～324)mIU · L^{-1}	地高辛	0.26nmol · L^{-1}	(0.3～5)nmol · L^{-1}
乙型肝炎表面抗体	0.2μg · L^{-1}		血清 T_3	0.08nmol · L^{-1}	(0.5～10)nmol · L^{-1}
皮质醇	5nmol · L^{-1}	(100～2000)nmol · L^{-1}	血清 T_4	1.0nmol · L^{-1}	(10～300)nmol · L^{-1}
甲胎蛋白	0.1kU · L^{-1}	(1～1000)KU · L^{-1}	催乳激素	0.04μg · L^{-1}	(0.25～250)μg · L^{-1}
先天性梅毒	0.125U · L^{-1}	(1～250)IU · L^{-1}	卵泡刺激素	0.05IU · L^{-1}	(1～256)IU · L^{-1}
人绒毛膜促性腺激素	0.5μ · L^{-1}	(2～10000)U · L^{-1}	癌胚抗原	0.2μg · L^{-1}	(1～100)μg · L^{-1}
铁蛋白	2.0μg · L^{-1}	(5～450)μg · L^{-1}	免疫球蛋白E	0.025KU · L^{-1}	(1～1000)KU · L^{-1}
			性激素结合球蛋白	0.08nmol · L^{-1}	(6.25～200)nmol · L^{-1}

表 23-4　铕标记荧光免疫测定药盒[17]

名称	灵敏度	精确度		标准曲线范围	正常值	次数/盒	方法
		批内	批间				
铁蛋白	2.0μg · L^{-1}	<7%CV	(5～12)%CV	0, 5, 25, 75, 150, 450μg · L^{-1}	女 38μg · L^{-1} 男 78μg · L^{-1}	96	多克隆抗体,直接夹心
hCG	0.5Iu · L^{-1}	<10%CV	(5～12)%CV	0,2,10,100,1000,5000,10000 Iu · L^{-1}	<3Iu · L^{-1} 绝经妇女<10Iu · L^{-1},孕妇一周(10～50)Iu · L^{-1}	96	单克隆抗体,直接夹心
hAFP	0.1Iu · ml^{-1}	<7%CV	(5～10)%CV	1, 10, 100, 500, 1000 Iu · ml^{-1}	>2.5×均值=升高	96	单克隆抗体,直接夹心
hTSH	0.03μIu · ml^{-1}	约 5%CV	(5～10)%CV	0,0.25,1.5,9.54,324μIu · ml^{-1}	1.84±2.26 μIu · ml^{-1}	96	单克隆抗体,直接夹心
hLH	0.12Iu · L^{-1}	<10%CV	<10%CV	0,1,5,50,250 Iu · L^{-1}		96	单克隆抗体,直接夹心
新生儿 hTSH	2.0μu · ml^{-1}	<10%CV	<10%CV	1,25,100μu · ml^{-1}	20μu · ml^{-1}	960	单克隆抗体,直接夹心
皮质醇	5nmol · L^{-1}	(5～6)%CV	<10%CV	0, 100, 200, 500, 1000,2000n mol · L^{-1}	478nmol · L^{-1}	96	多克隆抗体,竞争法
HBsAg	0.12ng/样二步法	阳性对照 10.3% 阴性对照 6.7%		2, 1, 0.5, 0.25, 0.12,0.06,0.03 ng · ml^{-1}		96	抗体中一为多克隆,一为单克隆,直接夹心
地高辛	<0.2ng · ml^{-1}	(3～7)%CV	(5～7)%CV	0,0.25,0.5,1.0,2.0,4.0ng · ml^{-1}	毒性分界值 2.0ng · ml^{-1}	96	多克隆抗体,竞争法

九、低温荧光测定

一般荧光法都是在室温下进行的。有许多有机化合物，其化学结构颇为接近，而且存在着多种同分异构体和衍生物，在室温时它们的荧光光谱呈现宽广的谱带，鉴别表征都难以进行，更不用说定量测定了。然而在低温和特殊条件下，这类物质能给出尖锐的荧光谱线，能对样品中所含荧光体进行“指纹识别”，甚至有可能对混合物中某些特定组分进行定量测定。

低温荧光法大体有 4 种类型：

①冷冻溶液 Shpol'skii 荧光法某些芳族化合物在 77K 或更低温度下在正构链烷溶剂形成的结晶基体中，给出分辨很好的精细结构荧光光谱。

②蒸气相基体隔离荧光法把液体或固体样品气化，与大量（以摩尔计算约 10^4～10^6 倍）稀释气体混合，把混合物沉积在冷冻的光学窗上，以供荧光分析之用。

③基体隔离 Shpol'skii 荧光法用基体隔离法把样品隔离在蒸气沉积的正构链烷基体中，而在测量荧光光谱之前，进行短时间的“退火”。

④荧光狭线法在低温（≈4K）下用宽度约为 1～2cm^{-1}的狭窄激光线激发，在有机玻璃体中的多环芳烃也可得到锐线的荧光光谱。

十、固体表面荧光测定

固体表面荧光测定是先将待测组分吸附在固体物质表面上，然后进行荧光测定。已采用过的固体物质有硅胶、氧化铝、滤纸、硅酮橡胶、乙酸钠、溴化钾、蔗糖、纤维素等。

固体表面荧光测定常与薄层色谱法或高效薄层色谱法联合使用。将样品点滴在薄层色谱板上，经分离后对各个组分进行荧光强度的测量，并测绘荧光发射光谱与激发光谱。由薄层色谱的 R_f 值、荧光发射光谱及激发光谱可定性鉴别各个不同组分。用样品的荧光强度和标准物质的荧光强度可以进行定量分析。

固体表面荧光测定有两种不同型式，一为反射式，一为透射式。采用反射式时，激发光源和荧光检测器同在样品的一边，一般互成 45°角。紫外激发光聚焦于固体表面样品斑点上，样品发生的荧光经单色器色散后由检测器检测。采用透射式时，一般将样品吸附在透明的薄层色谱板上，激发光源和检测器分处在样品的两边。紫外激发光经滤光片除去可见光，聚焦在样品斑点上而发生可见光荧光，荧光透过薄层板再经单色器色散，然后由检测器检测。

十一、荧光动力学分析法

化学反应的速率与反应物的浓度有关，在某些情况下还与催化剂（有时包括活化剂、阻化剂）的浓度有关。假如化学反应的某种反应物或产物是荧光物质，可采用荧光法来监测反应的速率，称为荧光动力学分析法。

（一）荧光动力学分析法的类型

1. 非催化法

非催化法是通过测量非催化反应的速率而测定某种反应物（分析物质）的浓度。

2. 催化法

在合适的条件下，催化反应的反应速率与催化剂的浓度成正比，因此，可测定某些对指示反应有催化作用的痕量物质，也可测定某些对催化反应起助催作用或抑制作用的物质。

3. 酶催化法

酶催化法是基于酶催化的反应，在合适的条件下，酶催化反应的反应速率与酶浓度成正比。当底物浓度较低时，反应速率也正比于底物的浓度，且与活化剂的浓度成正比，并与抑制剂的浓度成反比。

（二）分析物含量的测定

反应开始后立即记录其荧光强度（F）与时间（t）的关系曲线，在获得一系列标准溶液所相应的 F-t 曲线后，可通过正切法（斜率法）或固定时间法或固定荧光强度变化法以获得校正

曲线，从而求出试样中被测物的含量。

1. 正切法

从 F-t 曲线求出反应速率 $\Delta F/\Delta t$，然后作出 $\Delta F/\Delta t$-浓度（c）的校正曲线。

2. 固定时间法

使反应准确地进行到某一固定的时刻 t，立即测定其荧光强度，然后作出 F-c 校正曲线。

3. 固定荧光强度变化法

测量荧光强度的变化值达到某一规定值所需的时间 t，然后作出 $1/t$-c 的校正曲线。

第二节　无机化合物的荧光分析

无机化合物的直接荧光测定，以铀和稀土元素分析为主。绝大多数无机化合物都是与有机试剂发生反应转变为荧光物质而后进行测定（即荧光呈现法），利用的反应类型有形成配合物、置换反应、氧化还原反应、催化反应和酶反应等。基于无机化合物对荧光试剂或荧光配合物的荧光猝灭作用的方法（即荧光猝灭法）测定无机物，约占全部文献的五分之一，其中也不乏一些高灵敏度的方法，但其线性范围和选择性不如荧光呈现法。表 23-5（见 1240 页）汇总了近十几年国内外各种无机离子或化合物的荧光分析方法。表中被测物质以元素符号字顺排列，文献［1］，文献［2］和文献［3］是三本专著，文献［4］，文献［5］和文献［6］是三篇国内文献的综述。如要详细了解其测定方法可查找所引的原始文献。

第三节　有机化合物的荧光分析

荧光法可以分析痕量和超痕量的有机物。在各种环境样品--大气、水、土壤、动植物材料、食品和饲料中，荧光法用来测定其杂质，也还应用于药物、农药、毒素、胺类、氨基酸以及其他生物样品的分析。

一般的荧光分析法的选择性不够好，这是实际应用荧光法的主要障碍。但荧光法与色谱法［包括纸色谱、柱色柱、薄层色谱（TLC）、高效薄层色谱（HPTLC）、液相色谱（LC）、离子交换色谱（IEC）、高效液相色谱（HPLC）、气固体色谱（GSC）、气液色谱（GLC）等］、萃取、电泳、沉淀、吸附等其他分离手段相结合后，使荧光法的应用有了新的极大可能。特别是随着荧光分析新技术的发展，如：同步荧光法、导数荧光法、时间分辨荧光法、相分辨荧光法、偏振荧光法、低温荧光法、激光荧光、荧光免疫分析等，就使得灵敏度高、选择性好、取样量少、分析操作快速简便等成为荧光分析法的突出优点，使荧光法成为各领域中进行痕量和超痕量物质分析的一种重要手段。某些有机物的色谱-荧光测定法见表 23-6 至表 23-13。

许多有机物当用紫外光照射时会发射荧光，但只有少数化合物发射的荧光强度足以保证必要的分析灵敏度。自身具有荧光的有机物质有多核芳香烃、霉菌毒素、染料色素、氨基酸、核蛋白、生物碱、辅酶、维生素、氧环化合物、以及其他药物和生物活性物质等等。迄今为止已经拍摄了许多有机物的激发光谱和荧光光谱，估算了它们的荧光量子产额，有不少化合物的特征是在酸性或碱性介质中荧光有所增强。

荧光法不仅适用于本身具有荧光的物质的分析，还有不少试剂能与许多有机物形成荧光衍生物。进一步再利用环化、缩合、氧化、还原、与酸碱作用、加热和光照等反应，能分析许多自身没有荧光的有机物。

某些有机化合物的荧光分析见表 23-14。

表 23-5 无机离子或化合物的荧光分析方法

表中符号：

C—配合物法；F—直接发光法；Q—荧光猝灭法；Cat—催化法；S—置换法；R—氧化还原法；Enz—酶法；E—萃取法；β-CD—β-环糊精；CTMAB—溴化十六烷基三甲铵；DBM—二苯甲酰甲烷；HFA—六氟乙酰丙酮；HRP—辣根过氧化物酶；HVA—高香草酸；N 263—氯化甲基三烷基铵；OP—烷基酚聚氧乙烯醚；phen—1,10-邻菲罗啉；PVA—聚乙烯醇；$TPPS_4$—meso-四（对磺基苯）卟啉；TTA—2-噻吩甲酰三氟丙酮；TOPO—三辛基氧化膦

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·mL⁻¹)	应用	文献
Ag	Ag-曙红Y-phen	Q	NH_4Ac(1%)	530/545		10		5
	Ag-曙红B-phen-Tween80	Q	pH5.5	550/600	[illegible]	1.6×10²	照相液	5
	Ag-8-羟基喹啉-5-磺酸-$K_2S_2O_8$-[illegible]盐	C	pH10	325/420	(2~40)μg·L⁻¹	2	废水	5
	Ag-phen-$TPPS_4$	Q	pH9.5	438/648		0.88		5
	Ag-phen-曙红-Triton X-100	Q	NH_4Ac(0.2%)	315/545		5.0×10²		5
	Ag-$K_2S_2O_8$-8-羟基喹啉-5-磺酸	R		325/420	(2~40)μg·L⁻¹	2	工业废水、废液水	4
	[illegible]-Triton X-100-Ag	C	—	500/566	(0~0.6)μg·mL⁻¹	—	铜、铜锌合金、[illegible]	4
	Ag-Phen-$TPPS_4$	Q		419/656	(0~8)μg/25mL		矿样	4
	Ag-[illegible](乙醇)	Q	0.1mol·L⁻¹ NaOH	409/520	(1.0×10⁻⁷~1.0×10⁻⁶)mol·L⁻¹	8.0×10⁻⁹mol·L⁻¹	[illegible]	5
	Ag-[illegible]-3,5-二溴水杨醛[illegible]	Q	pH=8~9	385/500	(0.04~20)μg/25mL	5.54	[illegible]	5,142
	丁基罗丹明B-Br⁻-Ag	C(E)			(10⁻¹~1)μg·mL⁻¹			1
	曙红-Ag	C(Q)				3.7×10²		1
	曙红-吡啶-Ag	C(E)				85		1
	8-羟基喹啉-5-磺酸-过硫酸盐-Ag	Cat	—	375/485	(0.0125~5)μg·mL⁻¹	—		1,3
	8-羟基喹啉[illegible]-H_2O_2-Fe(Ⅲ)	Cat	—	365/445	(0.05~0.4)μg·mL⁻¹	—		1,3
	2,3-[illegible]-Ag	C(Q)	pH10.5	358/406	(2.5×10⁻³~10⁻¹)μg·mL⁻¹	—		1,2
	Ag-phen-曙红	C(Q)	—	300/545	(4~40)μg·mL⁻¹	—		1,3
	Ag-phen-3,4,5,6-四氯荧光素	C(Q)			(0.05~0.6)μg·mL⁻¹			1
	Ag-[illegible]-Br⁻	C(E)	—	—	(5~500)ng·mL⁻¹	—		1
	罗丹明6G-Br⁻-Ag	C(E)	—	—	(0.06~0.5)μg·mL⁻¹	—		1
Al	Al-[illegible]	C	pH5.0	480/505	—	0.30		6
	Al-桑色素-[illegible]	C	pH5.3	420/500	—	25		6
	Al-羟基萘酚蓝	C	pH5.0	550/550	—	0.1		6
	Al-水杨基荧光酮-CTMAB	C	pH5.8	/558		3.8		5
	Al-4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	C	pH=5.4~6.0	358/540	(0.05~5.5)μg/25mL	2	自来水	5
	Al-桑色素-十二烷基磺酸钠	C	pH=3.0~3.5	421/492	-	0.2		5
	Al-1-(2'-吡啶偶氮)-2-萘酚	C	乙醇介质	340/560	-	5.0×10²		5
	Al-[illegible]	C	pH2.9	585/620	[illegible]	[illegible]	粮食、头发	4
	Al-2-(5'-[illegible]-2'-[illegible]苯偶氮)-4-乙氧基-5-甲酚	C	pH=4.0~5.5	525/545	(0~100)ng·mL⁻¹	1.5	矿样	4
	Al-钙黄绿素	C	pH5	475/508	(0.02~6)μg·mL⁻¹	3.4	[illegible]	5
	Al-水杨醛苯甲酰腙	C	pH5.0	375/430	(0~1.4)μg/10mL	0.4	试剂	5
	Al-[illegible](对羧基苯基)卟啉	Cat	pH6.0	384/[illegible]	(0~2.0)μg/25mL	2	矿样、合金钢、钢铁	5

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·mL^{-1})	应用	文献
Al	Al-2-羟基-(2-羟基-4-磺酸-1-萘偶氮)-3-萘酸	C	pH4.0	570/600	$(10^{-7}\sim4\times10^{-5})$mol·L^{-1}	7.9×10^{-9}mol·L^{-1}	试剂	5
	Al-桑色素-十二烷基磺酸钠	C	pH4.0	410/495	(0~8.0)ng·ml^{-1}	0.001	水样	7
	Al-钙红素 N,N,N',N'四乙酸	C	中性	260/560	(0~100)μmol·L^{-1}	0.1μmol·L^{-1}	血清、自来水	8
	Al-氯-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH6.8	375/495	(0~10)μg/25ml	0.8	自来水、试剂	5
	Al-桂皮醛水杨酰腙	C	pH4.85	410/485	(0~5.8)μg/10ml	0.2	试剂	9
	Al-桑色素-含氮有机溶剂	C	pH3.2	420/510	(0~1.0)μg/10ml	1.6	试剂	10
	Al-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-溴化十六烷基三甲铵	C	pH5.5	385.6/488~528, Δλ=80nm		…		11
	Al-荧光镓	C	pH=3.5~5	535/590	(0~55.5)μmol·L^{-1}	0.18μmol·L^{-1}	血清	5
	Al-2-(2',4'-二羟基苯偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH=5.00~5.75	522/570	(0~5.056)μg·ml^{-1} (0.128~2.256)μg·ml^{-1}	30 —	[illegible]	5
	Al-铬黄绿素-CTMAB-Tween-80	C	pH=3.3~4.3	476/520	(0~8.0)μg·ml^{-1}	5.42	植物样	5
	Al-酸性铬蓝K	C	pH5.0	520/585	$(10^{-8}\sim6\times10^{-6})$mol·L^{-1}	4.8×10^{-9}mol·L^{-1}	人发、钢样	5
	Al-桑色素-TritonX-100	C	NaAc-HAc	420/490~510	(0~50)μg/25ml	-	人发	12
	Al-2,4-二羟基苯甲醛异烟酰腙	C	pH=4.2~4.6	384/461	(0~240)μg·L^{-1}	0.45	$NaHCO_3$、饮用水	13
	Al-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH6.0	357/507		1	水	14
	Al-[illegible]红S	C	—	—	(0.08~0.8)μg·ml^{-1}	—		1
	2,2'-二羟基偶氮苯-Al	C(E)	—	—	(0.5~500)ng·ml^{-1}			1
	Al-2,4-二羟基苯甲醛缩氨基脲	C			(0.08~80)ng·ml^{-1}		海水、铜、铁	1,3
	2,4-二氯代-4(4-羟基-5-甲基-2-吡啶偶氮)间苯二酚乙酯	C(E)			(0.5~1.5)μg·ml^{-1}			1
	[illegible]B-Al	C	—	—	(0~0.4)μg·ml^{-1}			1
	Al-4-羟基-3-(2-羟基-5-甲氧基苯偶氮)苯磺酸	C	—		(2~80)ng·ml^{-1}			1
	2-羟基-1-萘甲醛苯甲酰腙-Al	C		—	(0.1~1)μg·ml^{-1}			1
	3-羟基苯甲酸-2-羟基-1-萘亚甲基腙-Al	C	—			0.7		1
	2-羟基-3-萘甲酸-Al	C	pH5.8	/480	(2~25)ng·ml^{-1}			1,3
	4-(2-羟基苯偶氮)间苯二酚-Al	C	—		(2~40)ng·ml^{-1}			1
	3-羟基吡啶醛-2-吡啶腙-Al	C			(2~300)ng·ml^{-1}	—		1
	8-羟基喹啉-Al	C(E)		—	(2~240)ng·ml^{-1}	5	啤酒、钢	1,3
	8-羟基喹啉-5-磺酸-Al	C	pH=3.1~3.4	366/510	(2.4~10)ng·ml^{-1}			1,3
	Al-8-羟基喹啉-5-磺酸-甲基三辛基铵盐	C	—	—	(0.1~2)μg			1
	3-羟基-4',5,7-三甲氧基黄酮-Al	C	—		(20~100)ng·ml^{-1}	—		1
	荧光镓-Al	C	pH5.0	485/570	(0.02~0.32)μg·ml^{-1}	—	海水	1,3
	荧光试镁灵-Al	C		—	(1~120)ng·ml^{-1}	—		1

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	检出限/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
Al	4-甲氧基苯甲基-2-羟基-1-萘甲醛腙-Al	C			(0.4~200)ng·ml⁻¹			1
	4-甲基伞形酮-Al	C			(0.2~10)μg·ml⁻¹	—		1
	6-(4-甲基亚水杨基氨基)-m-甲苯酚-Al	C			(0.2~120)μg·ml⁻¹			1
	媒染蓝3R-Al	C	pH=5~7	350,540/592	(4~120)ng·ml⁻¹	—		1,3
	桑色素-Al	C		·	(0.25~50)ng·ml⁻¹	—	黄铜,青铜	1,3
	[illegible]-Al	C			(0.01~0.2)μg·ml⁻¹	—		1
	[illegible]R-Al	C	—	—	(4~360)ng·ml⁻¹			1
	[illegible] VSW-Al	C		—	(0.2~2)μg·ml⁻¹			1
	1,2,4-三羟基蒽醌磺酸盐-Al	C	—	—	(2~100)ng·ml⁻¹			1
	1-(2-吡啶偶氮)-2-萘酚-Al	C			(1~300)ng·ml⁻¹	—		1
	[illegible]-Al	C	—		(11~54)ng·ml⁻¹	—		1
	2-(间羟基苯氨基)苯酚-Al	C	—	—	(0.4~800)ng·ml⁻¹			1
	水杨醛-Al	C	—	—	(0.27~2.7)μg·ml⁻¹			1
	水杨醛甲酰腙-Al	C	—	—	(0.028~0.88)μg·ml⁻¹			1
	亚水杨基-o-氨基苯酚-Al	C	pH5.8,pH5.6	410/530	(0.27~3.7×10⁻¹)ng·ml⁻¹	—	钢铁	1,3
	o-(亚水杨基氨基)苯胂酸-Al	C	pH4.5	/545		150		1,3
	o-(亚水杨基氨基)-2-羟基苯磺酸-Al	C	—		(0.4~200)ng·ml⁻¹	—		1
	o-(亚水杨基氨基)-3-羟基[illegible]-Al	C	—	—	(0.27~100)ng·ml⁻¹			1
	N-亚水杨基-2-羟基-4-羧基苯胺-Al	C		400~480/	(0.2~120)ng·ml⁻¹	—		1,3
	N-亚水杨基-2-羟基-4-氯苯胺-Al	C	—	480~505	(0.2~220)ng·ml⁻¹	—		1,3
	N-亚水杨基-2-羟基-5-氯苯胺-Al	C			(0.08~80)ng·ml⁻¹	—		1,3
	吡啶-2-醛水杨酰腙-Al	C	—	—	(4~50)ng·ml⁻¹			1
	[illegible]-Al	C	—	—		20		1
	邻羟基苯偶氮间苯二酚-Al	C	—	—	(0.5~160)ng·ml⁻¹			1
	[illegible]紫红Y-Al	C	pH5	490/582	(0.8~200)ng·ml⁻¹	—		1,3
As	罗丹明6G-钼砷杂多酸	Q	硫酸介质	350/555	(0~2.0)μg/25ml	0.004	铜合金,铜矿水	15
	As-D-甘露醇-3-磷酸酯-甘油醇-3-磷酸脱氢酶	Enz	—	—	(0.02~2)μg·ml⁻¹			1,3
	As-罗丹明B-Cl⁻	C(E)	—	—	(0.06~5.0)μg·ml⁻¹			1
Au	$AuCl_4^-$-孔雀绿-丁基罗丹明B	S	苯-丙酮(5:1)	525/550	(0~2.0)μg/6ml	1.07	阳极泥	5
	Au-5-苯偶氮基-8-氨基喹啉	C	0.2mol·L⁻¹HCl	365/400		5		5
	Au-荧光素汞-S²⁻	S	0.1mol·L⁻¹NaOH	455/530		0.1		5
	Au-4-(对甲氧基)-1,3,6-二苯基吡啶硼	C	6mol·L⁻¹HCl 5ml	395/450		—		6
	Au-[illegible]-吡咯烷二硫代氨基甲酸铵	Q	pH2.75	520/545	(0~180)ng·ml		矿样	15
	Au-8-氨基喹啉-5-偶氮-对-苯酚	C	—	365/420		4.5	矿样	4
	Au-吖啶黄-Cl⁻	C(E)		··	(0.01~5.0)μg·ml⁻¹	—		1
	Au-吖啶橙-Cl⁻	C(E)			(0.01~2.5)μg·ml⁻¹	—		1

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	检出限/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Au	Au-丁基罗丹明-Cl$^-$	C(E)	—	565/586	(0.02~0.2)μg·ml^{-1}	·		1,3
	AuCl$_4^-$-丁基罗丹明B-[illegible]	C(E)			(2~330)ng·ml^{-1}		矿样	1,3
	AuCl$_4^-$-P-二甲基氨基亚苄基罗丹宁	C(E)			(0.07~0.7)μg·ml^{-1}			3
	Au-2,2'-联[illegible]	C(L)	pH2.5	347/425	(55~250)ng·ml^{-1}	·		1,3
	Au-5-羟基-2-羟甲基-1,4-吡喃酮	C	—	—	(0.01~1)mg·ml^{-1}	—		1
	AuBr$_4^-$-罗丹明B	C(E)	—	—	(0.05~5)μg·ml^{-1}	—		1
	AuCl$_4^-$-罗丹明B	C(E)	苯-丙酮	560/586	(17~172)ng·ml^{-1}	·		1,3
B	BF$_4^-$-亚甲蓝	C	1,2-二氯乙烷萃取	468/690	—	0.5		6
	B-姜黄素-草酸	C		560/600	(3~30)ng·ml^{-1}	1	饮水,土壤	6
	B-二苯甲酰甲烷	C	浓硫酸溶液,氮分子激光器	/405	(0~150)ng·ml^{-1}	0.02	U_3O_8	4
	B-[illegible]	C	pH7.0	528/544	(0~40)μg·ml^{-1}	40	铁合金,钢铁	5
	B-乙酰水杨酸	C	浓H_2SO_4	365/415		10		2
	B-[illegible]S	C	浓硫酸介质			1000		2
	B-安息香	C	碱性介质	370/490	(0.05~0.5)μg·ml^{-1}	—	钢	1,2,3
	B-丁基罗丹明B-F$^-$	C(E)	pH=2~3	348/583	(1~50)ng·ml^{-1}	·		2
	B-胭脂红酸	C	中性	475/585		2.5×10		2
	B-铬变酸	C	pH5.7	313/380	(0.01~0.5)μg·ml^{-1}		自来水,海水,盐泉水	2,3
	B-二苯酰基甲烷	C(E)	H_2SO_4-乙醇	385/413	(0.5~6)ng·ml^{-1}	0.5	$SiCl_4$,Sb_2O_3,$SiCl_4$	2,3
	B-2,4-二羟基二苯甲酮	C	浓硫酸介质	365/503	(5.6~180)ng·ml^{-1}	·		2
	B-1,4-二羟基蒽醌	C	浓硫酸介质		(40~80)ng·ml^{-1}			1,3
	B-羟基-2-甲氧基-9-氯-4'-二苯甲酮	C	浓硫酸介质	380/490	(0.12~12)ng·ml^{-1}	·	钢,天然水,血	1,3
	B-桑色素-草酸	C	丙酮-乙醇	420/505	(0~10)μg·ml^{-1}	0.1	天然水	1,2,3
	B-苯基荧光酮	C	弱碱性pH9.0	—	—	10		2
	B-原儿茶酸	C	—	—	(0.5~10)μg·ml^{-1}	—		1
	B-[illegible]-草酸	C	冰乙酸	443/505	(0~10)μg·ml^{-1}	0.5		1,2
	B-[illegible]	C	91%~96%H_2SO_4	365/555	(0.01~0.2)μg·ml^{-1}	—		1,2
	B-[illegible]苯乙酮	C	浓硫酸介质	365/	(2.5~7.0)mg/25ml			9
	B-罗丹明6G-水杨酸	C(E)	C_6H_6-CCl_4+HF+HCl	355/440	(20~280)μg·ml^{-1}	1	水,土壤,植物,矿物	1,2,3
	B-水杨酸	C	H_2SO_4-乙酸	—	—	5		1,2
	B-[illegible]试剂I	C	浓硫酸介质	365/567	(0.01~0.5)μg·ml^{-1}	···	高纯$SiCl_4$	1,2,3
Be	Be-钙试剂	C	pH=(5.9~6.8)	380/485		0.5	饮水	5
	Be-桑色素	C	pH10.0	440/500	(1~12)ng·ml^{-1}	0.1	大气悬浮物,天然水	4
	Be-2-羟-3-萘甲酸	C	pH=6.5~7.5	375/456	(0~10)μg·ml^{-1}	0.006	天然水	17
	Be-桑色素	C	pH5.5	433/517	(0.6~97.5)ng·ml^{-1}	3.3	饮用水	18
	Be-偶氮氯膦mA(乙醇水溶液)	C	pH=5.9~7.1	555.1/614.4	(0~5.8)μg/25ml	15	水样,铜合金	5
	Be-7-(4'-甲基-2'-磺酸基苯偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH7.0	474/514	(0~0.036)μg·ml^{-1}	2.5	自来水	5

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml⁻¹)	样品	文献
Be	Be-7-(2'-吡啶基-3'-羧基去偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH=6.5~7.5	450/537	(0~5)μg/25ml	0.09	水,树	2
	1-氨基-4-羟基蒽醌-Be	C	碱性溶液	500~580		200		1,3
	3-氨基-5-磺基水杨酸-Be	C	pH5.2	370/455	(5~1000)ng·ml⁻¹		生物物质	1,3
	Be-偶氮胂Ⅰ	C	—	—	(4~300)μg·ml⁻¹	—		1
	Be-偶氮氯膦Ⅰ	C	—	—	(4~300)μg·ml⁻¹	—		1
	Be-3-(二羧甲基氨甲基)-2-羟基-4-羧甲酸	C	pH5.4	350/450	(5.6~720)ng·ml⁻¹			1,3
	5,8-二氯酚酞-Be	C			(0.1~200)μg·ml⁻¹			1
	二氯酚靛酚钠-Be	C			(0.02~0.2)μg·ml⁻¹			1
	3,4-二氯代-4-(3-羟基-6-甲基-2-吡啶基)-3-丁酸乙酯-Be	C(E)	乙醇溶液	405/440	(0.5~20)μg·ml⁻¹	—	人体血液	1,3
	Be-2-乙基-5-羟基-7-甲氧基异黄酮	C(E)	—	—	(0.4~120)ng·ml⁻¹	—		1
	2-乙基-3-甲基-5-羟基色酮-Be	C(E)	$CHCl_3$萃取	400/480	(1~250)ng·ml⁻¹			1,3
	1-羟基-2-羧基蒽醌-Be	C	碱性介质	470/580	(0.03~0.13)μg·ml⁻¹	—		1,3
	Be-5-氯基水杨醛缩-2-羟基-5-甲基苯胺	C	—	—	(4~200)ng·ml⁻¹	—		1
	α-(2-羟基亚萘基)苯胺酚-Be	C		—	(4~200)ng·ml⁻¹			1
	Be-2-羟基-3-萘甲酸	C(E)	pH≥8.5	/400	(0.18~1.80)ng·ml⁻¹			1,3
	Be-8-羟基喹啉	C(E)	$CHCl_3$萃取	—	(8~80)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Be-6-甲基-1-羟基蒽酮	C(E)	—	—		1		1
	Be-6-(4-甲氧基苯基偶氮苯)-m-甲苯酚	C	—		(0.8~280)ng·ml⁻¹			1
	Be-桑色素	C	碱性溶液		(0.2~1.0)ng·ml⁻¹		海水,矿石,生物试样	1,3
	Be-桑茜	C			(0.1~100)μg·ml⁻¹			1
	Be-α-吡啶偶氮萘酚	C	pH=12.7~13.4		(1.3~530)ng·ml⁻¹	1.3		1,3
	Be-绿脓素	C	—	—	(0.1~100)μg·ml⁻¹	—		1
	Be-玫瑰硝酸	C	—	—	(1~7)ng·ml⁻¹	—		1
	Be-α-(2-水杨基氨基)苯甲酸	C(E)	pH 5~6	365/500		0.1	矿物物质	1,3
	Be-α-(水杨基氨基)-2-羟基苯磺酸	C	—		(0.4~200)ng·ml⁻¹			1
	Be-α-(水杨基氨基)苯甲酸	C		—	(2~500)ng·ml⁻¹	—		1
	Be-N-亚水杨基-2-羟基-5-磺基苯胺	C	pH9.7	343/480	(1~500)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Be-四环素-5,5-二乙基巴比妥酸盐	C	pH9	405/505	(0.1~0.3)μg·ml⁻¹	—		1,3
	Be-2-羟基苯甲酸盐-苯酚	En	—	/450	(10~500)ng·ml⁻¹	—		1
Bi	Bi-丁基罗丹明B-SCN⁻-PVA-硫氰酸盐	Q	—	555/610	(20~200)ng·ml⁻¹		钢铁	4
	Bi-三溴苯基荧光酮-CTMAB	Q	pH2.6 甲酸介质	535/561	(0.02~1.2)μg·ml⁻¹		岩矿	5
	Bi-苯芴酮-磷钼酸盐-甲酸盐	Enq	pH6	365/450	(1~20)μg·ml⁻¹			1,3
Br	Br^--H_2O_2-罗丹明B	Cat	H_2SO_4介质	400/530	(5~55)μg/25ml	0.85μg/25ml	食品溶解度	6
	Br^--BrO_3^--丁基罗丹明B-氯化十六烷基吡啶	Q	0.6mol·L⁻¹ H_2SO_4	405/530	(0.25~6.25)μg/25ml	0.25μg/25ml	合成样	5
	荧光素-H_2O_2-Br^-	R(Q)	乙酸盐	440/510		2		5
	Br^--[illegible]	C	[illegible]		(0.6~[illegible])μg·ml⁻¹	—		1

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	检测限/($ng\cdot ml^{-1}$)	应用	文献
BrO_3^-	苯基-2-吡啶酮-2-吡啶腙	R	—	—	$(0.26\sim1.30)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
Ca	Ca-钙黄绿素	C	pH12	400/520			血清	6
	Ca-钙黄绿素	C	pH12	400/470		20		6
	Ca-Quin2-Triton X-100	C	pH7.45	339/492	—	—	灸血小板制剂	20
	Ca-Quin2-AM	C	pH7.4	330/492			人血	21
	Ca-Fura/AM	C		340,380/500	—		兔血	22
	Ca-1,5-双(二羧基甲基氨基甲基)-2,6-二羟萘	C	pH11.7	385/445	$(0.1\sim20)ng\cdot ml^{-1}$			1,3
	Ca-钙黄绿素	C	—	—	$(15\sim140)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Ca-2,4-二羟基苯醛	C	—	—	$(0.15\sim0.4)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Ca-1,8-二羟基萘醛	C			$(0.05\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Ca-8-羟基喹啉	C	—	375/520	—	10		1,3
	Ca-Fura 3	C	pH7.05	512/410	—	$10^{-8}mol\cdot L^{-1}$	细胞钙	23
	Ca-Fura 1	C	pH=7.0~8.0	492/520	$(2\sim660)nmol\cdot L^{-1}$		细胞钙	24
Cd	Cd-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH7.0	400/510	$(0\sim2.0)\mu g/25ml$	2	自来水,人发	5
	Cd-铁试剂-CTMAB	C	pH=5.5~6.5	365/524	$(0.01\sim4)\mu g\cdot ml^{-1}$	2.5	食用面粉	5
	Cd-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH5(NaAc-HAc)	385/520		2		5
	Cd-罗丹明 B-I⁻-PVA 124	C	$0.2mol\cdot L^{-1}H_3PO_4$	365/597	$(0.1\sim0.4)\mu g\cdot ml^{-1}$	2	粮食	5
	Cd-H_2O_2-HRP-高香草酸	Enz	pH8.5	/444		0.5		6
	Cd-碘化钾-罗丹明 6G-γ-CD	Q	$1.33mol\cdot L^{-1}H_3PO_4$	365/554	$(0\sim0.6)\mu g/25ml$	0.31	矿样,水样	5
	CdI_4^{2-}-罗丹明 S-PVA 124	Q	$1.33mol\cdot L^{-1}H_3PO_4$	365/558	$(0.1\sim0.5)\mu g/25ml$	0.88	环境水样,岩矿	5
	Cd-Co-α,β,γ,δ-四(4-磺苯基)卟吩	Cm	pH8.5	432/644	$(0.5\sim16)ng\cdot ml^{-1}$		废水	25
	Cd-苯基-2-吡啶酮-2-吡啶腙	C			$(0.01\sim0.55)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Cd-3,3'-双(二羧基甲基氨基甲基)-4,4'-二羟基-反式-二苯乙烯	C	pH7.6	365/440	$(25\sim1500)ng\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Cd-钙黄绿素	C	pH11.8	492/520	$(2\sim500)\mu g\cdot ml^{-1}$	3.24		1,3
	Cd-2-(3,5-二甲基吡唑基)-8-羟基喹啉	C(E)			$(0.01\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Cd-2-(2-羟基-1-萘基)-二硫卡巴腙-4-磺苯酸	C(Q)	—	—	$(0.2\sim1.1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Cd-2-(2'-羟基苯基)苯并噁唑	C			$(2\sim40)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Cd-6-甲基-二氨基酚酸盐	C	—	—	$(0.15\sim1.1)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Cd-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH=7.1~8.5	/520	$(1\sim200)ng\cdot ml^{-1}$	—	$Cd(OH)_2$ 的溶解度	1,3
	Cd-8-羟基喹啉-5-磺酸-甲基三辛基氯化铵	C(E)	—	—	$(2\sim10)\mu g$			1
	Cd-邻二氮菲-二溴荧光素	C(E)			$(0.01\sim0.2)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Cd-邻二氮菲-曙红	C(E)	—		$(0.025\sim0.6)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Cd-邻二氮菲-四溴荧光素	C(E)	—		$(0.04\sim0.8)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Cd-邻二氮菲-碘代曙红	C(E)	—		$(0.035\sim0.8)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1

续表

待测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
Cd	Cd-8-羟基喹啉	C(E)	—	—	(0.05~1.5)μg·ml⁻¹	—	矿泉水	1,3
	Cd-8-亚水杨基[illegible]	C	-		(0~70)ng·ml⁻¹	·		1
	Cd-8-(甲苯-P-磺酰胺)喹啉	C(E)	—		(0.45~45)μg·ml⁻¹	—		2
Ce	Ce-盐酸-氯化羟胺	F	盐酸-氯化羟胺	256/351	(0~0.1)μg·ml⁻¹	9	稀土矿	6
	Ce-[illegible]	C	HCl(4%~35%)	3x1/35x	—	—		6
	Ce-硫酸	F	0.6mol·L⁻¹HCl	255/355	·	10	天然水	5
		F		255/335	(0~10)μg·ml⁻¹	—	金属材料、药材	1
		F	2mol·L⁻¹HCl	255/353	(0~0.5)μg·ml⁻¹	·		26
	Ce-CTMAB-8-羟基喹啉-5-磺酸	R	0.6mol·L⁻¹H_2SO_4	209/355	(2.0~200)ng·ml⁻¹	—	稀土-钨混合物	27
	Ce-L-色氨酸	C	5×10⁻³mol·L⁻¹H_2SO_4	305/347	(0.5~5)μmol·L⁻¹	—	稀土样品	5
	Ce-2-(2'-羟基苯基)[illegible]氨基乙酸	Cel	pH12.30	270/455	(0~1.5)mg/25ml	0.3	合成样	28
	Ce-KCl(pH<5.3)	F	pH=5~6	252/354	(0~5.0)μmol·L⁻¹	0.3nmol·L⁻¹	土壤、水系沉积物	5
	Ce-1-氨基-2-羟基蒽醌	R	—	430/575	(0.1~2.9)μg·ml⁻¹	·		1,3
	Ce-4,8-二氨基-1,5-二羟基蒽醌-2,6-二磺酸盐	R		285/595	(0.02~0.37)μg·ml⁻¹	—		1,3
	Ce-8-羟基喹啉-5-磺酸	R	H_2SO_4介质	370/465	(0.01~3)μg·ml⁻¹		合金、矿样	1,3
	Ce-[illegible]	C	pH4.5	300/300	(0.01~5)μg·ml⁻¹	—		1,3
Cl	Cl⁻-硫酸喹啉	Q	0.05mol·L⁻¹H_2SO_4	350/450	(5~35)μg·ml⁻¹	10⁴	地下水	6
	Cl-8-甲氧基-1-(3-磺化丙基)喹啉盐	C			(0.47~3.5)μg·ml⁻¹	—		1
	Cl-9-(5-硝基-2-呋喃基)[illegible]	C	—	—	(0.1~10)μg·ml⁻¹	··		1
	Cl-荧光素钠-Ag(I)	Q	—	—	(10~500)ng·ml⁻¹	·	高纯水	1,1
ClO_4^-	ClO_4^--3,5-二氨基-N-(氨甲酰甲基)-6-氯吡嗪羧酰胺	C(F)	4-甲基戊烷-2-酮,pH5	368/410	(0.037~3.5)μg·ml⁻¹	—		1,2
	ClO_4^--罗丹明6G	C(E)	··		(0.08~1)μg·ml⁻¹			1
CN	$Cu(CN)_2^-$-氨基荧光素	R	pH=7.5~8.6	290/440	(0~1.0)μg·ml⁻¹	1	环境水样	6
	CN-C[illegible]	S	pH=9~11	500/520	(0~5.5)μg·ml⁻¹	10	天然水、污水	6
	CN-C[illegible]荧光素	R	NaOH介质	484/514	(5.8~580)ng·ml⁻¹	2.5	水、空气	29
	CN-Pd(II)-8-羟基喹啉-5-磺酸-Al(III)	C	pH5.0	362/493	(0~2.5)μg·ml⁻¹	2	土壤、植物	30
	CN-[illegible]-8-羟基喹啉-5-磺酸锌	S	pH6.2	355/515	(0~50)μg/10ml		电镀厂废水	5
	CN-[illegible]-8-羟基喹啉-5-磺酸[illegible]-CTMAB	S	pH9.5	400/517	(0~0.6)μg·ml⁻¹	—	电镀厂废水	5
	CN-TPPS-Hg(II)-CTMAB	S	pH10.8	395/548	(0.02~0.1)μg·ml⁻¹	0.7	废水	31
	CN-p-苯醌	R	pH7.5	425/460	(0.2~50)μg·ml⁻¹	—		2
	CN-氯胺T-烟酰胺	R	KOH,$KHCO_3$		(0.3~6)μg·ml⁻¹			1,2
	CN-氯胺T-[illegible]	R	—	—	(1~60)μg·ml⁻¹			1
	CN-Cu(II)-钙黄绿素	S	—	485/520	(0.01~0.25)μg·ml⁻¹			2
	CN-Cu(II)-无色荧光素	R	—	494/515	(0~0.1)μg·ml⁻¹			2
	CN-Cu(II)-[illegible]	S	10⁻³mol·L⁻¹NaOH	355/495	(0~0.2)μg·ml⁻¹			2

续表

检测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	检测限/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
CN	CN-二(乙酸汞)荧光素-KI	S(Q)	pH8.5	490/519	(0.14~0.34)μg·ml⁻¹	—		1,2
	CN-高香草酸-H_2O_2-过氧化物酶	Enz	pH8.5	—	(1~100)μg·ml⁻¹	—		1,2
	CN-3-羟基苯乙酸盐-透明质酸酶	Enz	pH5.4	305/410	(0.1~4)μg·ml⁻¹			1,2
	CN-Pd(Ⅱ)-8-羟基喹啉-5-磺酸	S			(0.02~0.2)μg·ml⁻¹	—		1
	CN-Pd(Ⅱ)-苯并[c]硒二唑	S(E)	pH8,已烷	377/550	(0.33~3.3)μg·ml⁻¹	—		1,2
	CN-吡哆醛	Cat	pH10	365/438	(10~40)μmol·L⁻¹	20		1,2
	CN-醌-苯磺酸盐	R	二甲基亚砜	420/500		15		1,2
	CN-四乙酸汞荧光素	S(Q)	pH=5~6	517/	(0.066~0.260)μg·ml⁻¹			3
Co	Co-水杨基荧光酮-Triton	Q	pH=10.6~11.0	400/510	(0.3~3.0)μg·ml⁻¹	8×10⁻³	自来水、人发	6
	Co-H_2O_2-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	1.5mol·L⁻¹ H_2SO_4 0.7ml	275/470	(0.27~25)μmol·L⁻¹	5.4	植物样品	6
	Co-meso-四(N-甲基-3-吡啶基)卟啉 (TPA)-H_2O_2	C		316.5/435.0	(0.1~2.0)μmol·L⁻¹		血清	4
	Co-5-(4-甲氧基苯偶氮)-8-(对甲苯磺酰氨基)喹啉	C	pH 9.3~10.8	338/425	(0~85)ng·ml⁻¹	0.2	维他命、保肝	5
	Co-7-(8-羟基-3,6-二磺基萘偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH9.2	340/378	(0~0.51)μmol·L⁻¹	1.2nmol·L⁻¹	合成样	32
	镉(Ⅱ)-Co	C	pH9.5	240/378	(0~0.86)μmol·L⁻¹	1.4nmol·L⁻¹	合成样	33
	Co-5-(4-硝基苯偶氮)-8-(4-甲苯磺酰氨基)-喹啉	C	pH=9.0~11.2	345/420	(2~33)ng·ml⁻¹	0.1	维生素 B_{12}、生物样品	34
	Co-TPPS₄-Cd	S(Q)	pH=7.5~10.5	365/645	(0~0.2)μg·ml⁻¹	—	维生素 B_{12}	35
	Co-Al-过氧化物酶外源物	C(Q)	—	—	(1~20)ng·ml⁻¹	—		1
	Co-苯基-2-吡啶酮-2-吡啶腙-BrO_3^-	R,C		292/382	(0.2~280)ng·ml⁻¹	25		1,3
	Co-2,4-二氯苯基二苯基磷酸盐-SCN⁻	C(Q)	—	—	(0~4)μg·ml⁻¹			1
	Co-2-(2-羟基-1-萘基)二硫代缩氨脲-4-氨基苯基	C(Q)	—	—	(0.1~1.0)μg·ml⁻¹	—		1
	Co-高香草酸-H_2O_2-过氧化物酶		—	—	(0.5~20)ng·ml⁻¹			1
	Co-苯基-2-吡啶酮腙	Cat			(10~80)ng·ml⁻¹			[illegible]
	Cu-1,1-苯腙-罗红	C(E)	—	—	(10~100)ng·ml⁻¹	—		1
	Cu-2-吡啶酮-2-吡啶腙-罗红	C(E)	pH=5~6	530/558	(8~400)ng·ml⁻¹	8		1,3
	Cu-2-吡啶酮-2-吡啶腙-BrO_3^-	R,C		280/340	(20~150)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Cu-1-(2-吡啶偶氮)-萘酚	C	—	/436	(0.06~60)μg·ml⁻¹	59		1,3
	Cu-水杨基荧光酮-H_2O_2	Cat	—	/550	(0.1~2)μg·ml⁻¹	—	食盐、蛇肉	1,3
$C_2O_4^{2-}$	$C_2O_4^{2-}$-间苯二酚	R	Zn-HCl 硫酸盐-碳酸氢盐	495/520	—	80		2
	Ce(Ⅳ)-$C_2O_4^{2-}$	R	H_2SO_4-CeO_2	260/350	(80~440)ng·ml⁻¹			2
	Zr(Ⅳ)-黄酮醇	S(Q)	pH1.69	365/460	(5~100)ng·ml⁻¹			2
Cr	Cr-5-氨基-5-偶氮-对氨代苯	Q	0.03mol·L⁻¹ HCl	297/360	—	0.7		6
	Cr-CTMAB-二溴苯基荧光酮	Q	pH11.8	400/510				6
	Cr-二溴苯基荧光酮-CTMAB	Q	—	365/557	(5~150)ng·ml⁻¹		电镀废水	4

续表

被测组分	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	检出限/(ng·mL⁻¹)	应用	文献
Cr	Cr-二溴苯基荧光酮	Q	[illegible]mol·L⁻¹ HCl	408/503	(2~500)ng·mL⁻¹	30	废水	1
	Cr-铬酸盐	K	5.5~6.0mol·L⁻¹ H_2SO_4	460/495	(5~17.5)μmol·L⁻¹	1μmol·L⁻¹	工业废水	2
	Cr-[illegible]	Car	pH5.8	272/327	(1~200)ng·mL⁻¹	1	污水	3
	Cr-还原型罗丹明B-溴酸钾	Car		530/556	(4~32)ng·mL⁻¹	1	电镀水	4
	Cr-二溴邻硝基苯基荧光酮-OP	Q	pH=3.4~4.2	385/525	(25~500)ng·mL⁻¹	2	废水、人发、合金	5
	Cr-对乙酰氨基酚	Q	mol·L⁻¹ H_2SO_4(2mL)	380/452	(0.25~150)μmol·L⁻¹		钢铁、废水	6
	Cr-二溴羟基苯基荧光酮-CTMAB	Q	pH=2.4~3.4	475/502/525	(1.5~100)ng·mL⁻¹	1.3	水样	7
	Cr-邻苯二胺[illegible]	Q	pH=1.2~1.8	365/451	(8~800)ng·mL⁻¹	6.11	水样	30
	Cr-Ga(Ⅲ)-桑色素	C(Q)		—	(0.05~2)μg·mL			I
	Cr-(2-羟基苯基)苯并噻唑	R(Q)			(0.1~10)μg	—		I
	Cr-高碘酸钾-H_2O_2-过氧化物酶	Em			(10~100)μg·mL⁻¹			I
	Cr-[illegible]T-C	C(Q)	pH	515/560	(15~800)ng·mL⁻¹	...	NaCl	1,2,3
	Cr-Zn(Ⅱ)-水杨醛乙酰腙	C(Q)			(0.4~25)μg			I
	Cr-二氯[illegible]乙烯二羧酸钠	Q	pH=2.7~3.5	/430	(1.0~260)ng·mL⁻¹	—	HCl,$CaCl_2$	1,3
Cu	Cu-meso-四(对羟基苯基)卟啉-OP	Q	pH=5.3~8.8	424/653	(0~500)ng·mL⁻¹	2	合成样	6
	Cu-α,β,γ,δ-四(4-吡啶基)卟啉	Q	H_2SO_4介质	448/758	(0~800)ng·mL⁻¹	0.4	纯铝	6
	Cu-催化H_2O_2氧化无色荧光素	Car	pH6.2	360/520		0.2		6
	Cu-α,β,γ,δ-四苯基卟啉-OP	Q	pH=5~8	365/650	(0~2.1)μg·mL⁻¹	300	面粉	1
	Cu-5-苯基偶氮-8-羟基喹啉	C		322/505	(0~5.2)μg	—	高纯镍、铅	4
	Cu-α,β,γ,δ-四-(对苯磺基)卟啉	Q	—	413/643	(0~2.0)μg·mL⁻¹	5	[illegible]	4
	Cu-荧光素汞-乙醇	S	---	490/520	(10⁻⁷~1)μmol·L		矿样	4
	Cu-H_2O_2-罗丹明B	Car	pH5.0	558/575	(0.01~2.0)ng·mL⁻¹	0.05	食品、人发	4
	Cu-核黄素-H_2O_2	Car	pH5.0	440/530	(0.5~16)ng·mL⁻¹	0.1	人发	4
	Cu-硫酸-高邻苯二酚紫-H_2O_2	Car		365/482	(3~240)pmol·L⁻¹		铁矿石	4
	Cu-3-(2-羧基苯偶氮)罗丹宁	C	pH=5	310/420	(0~180)ng·mL⁻¹	9	[illegible]	5
	Cu-meso-四(4-甲基-3-磺酸基苯基)卟啉	Q	pH10.0	410/641		2.3	环境水样	37
	Cu-meso-四(4-乙酰氨基苯基)卟啉-OP	Q	pH=6.0~6.6	425/650.9	(0~120)μg·mL		小麦粉	38
	Cu-三乙醇胺-H_2O_2-还原型二氯荧光素	Car	pH7.25	505/522	(0.2~4.8)ng·mL	0.035	人发、指甲、自来水	39
	Cu-3-(4'-氯-2'-羧基苯偶氮)罗丹宁	C	pH=5.0~5.4	300/403	(10~900)ng·mL⁻¹	0.5	茶叶	3
	Cu-meso-四(4-三甲基铵基苯基)卟啉	Q	pH5.0	425/653	(0~2.1)ng·mL⁻¹	2	饮料	40
	Cu-3-苯基-5-(2-羧基苯偶氮)罗丹宁	C	pH5.6	305/403	(0~180)ng·mL⁻¹	0.5	猪肉、蔬菜	41
	Cu-3-(4'-氯-2'-羧基苯偶氮)-5-巯代-2-硫代四氢噻唑	C	pH=5.0~5.4	300/403	(10~900)ng·mL⁻¹	0.5	茶叶	42
	Cu-3-对氯苯基-5-(2'-羧基苯偶氮)罗丹宁	C	pH=5	305/405	(5~640)ng·mL⁻¹	0.5	[illegible]	43

被测物质	试剂	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
Cu	Cu-双(4-[illegible]偶氮[illegible]水杨醛)[illegible]二胺	Q	pH8.[illegible]	325/435	(0~50)ng·ml⁻¹	1	无机盐,矿泉水	44
	Cu-[illegible]	R	[illegible]mol·L⁻¹NaOH	375/440	(0.34~400)ng·ml⁻¹	0.25	人发,[illegible]	5
	Cu-α,β,γ,δ-四(对羧基苯)卟啉-CTMAB-TritonX-100	Q	pH4.6	413/657	(0~40)ng·ml⁻¹	5	[illegible]	[illegible]
	Cu-H_2O_2-对苯二酚	Co	pH[illegible]	297/330	(0~60)ng·ml⁻¹	0.7	[illegible]水,天然水	45
	Cu-8-[illegible]	Q	pH[illegible]	395/490	(0~100)ng·ml⁻¹	4.7	天然水	47
	Cu-8-[illegible]	C	(0.05~0.15)mol·L⁻¹NaOH	32[illegible]/370	(5~100)ng·ml⁻¹	–	[illegible]	48
	Cu-[illegible]	C(Q)		31[illegible]/405	(60~600)ng·ml⁻¹	–		1,3
	Cu-[illegible]	C(Q)	–	–	(10~100)ng·ml⁻¹	–		1
	Cu-[illegible](p-二乙基[illegible])乙酸	Co			(0.2~0.4)ng·ml⁻¹			1
	Cu-2,2'-[illegible]	Co	–	356/430	(0.4~1)μg·ml⁻¹	–		1,3
	Cu-2,2'-[illegible]	Co	–	367/420	(0.2~0.5)μg·ml⁻¹	–		1,3
	Cu-[illegible]	C(Q)	–	–	(0.5~2.5)μg·ml⁻¹	–		1
	Cu-[illegible]H_2O_2-过氧化物酶	Enc	–	–	(0.012~5)μg·ml⁻¹	–		1
	Cu-2-[illegible]	Co	[illegible]	355/485	(0.1~0.5)μg·ml⁻¹			1,3
	Cu-N,β-[illegible]	C(Q)	–		(8~1200)ng·ml⁻¹	–		1
	Cu-2-羟基-1-[illegible]	C(Q)	pH4.5	4[illegible]/520	(0.2~1.1×10³)ng·ml⁻¹	–		1,3
	Cu-2(2-[illegible])	C(Q)	–	–	(0.1~1.1)μg·ml⁻¹	–		1
	Cu-N,β-[illegible]	C(Q)			(1~500)ng·ml⁻¹			1
	Cu-3-[illegible]	Co	–	–	(0.2~6)μg·ml⁻¹	–		1
	Cu-[illegible]	Co		/570	(1~100)ng·ml⁻¹	0.1	[illegible]水,[illegible]	1,3
	Cu-邻二氮菲-[illegible]	C(E)	–		(10~100)ng·ml⁻¹	–		1
	Cu-邻二氮菲-[illegible]	C(E)		560/570	(1~6)ng·ml⁻¹			1,3
	Cu-[illegible]	Co	–	308/455	(0.12~0.6)μg·ml⁻¹	–		1,3
	Cu-[illegible]	C	–	–	(60~200)ng·ml⁻¹	–		1
	Cu-[illegible]	C			(0.05~1)μg·ml⁻¹	–		1
	Cu-α,β,γ,δ-四[illegible]卟啉-[illegible]	C(Q)		434/657	(5~60)ng·ml⁻¹			1,3
	Cu-[illegible]	C	–	390/650	(0.1~30)μg·ml⁻¹	–		1,3
	Cu-维生素B_1	R(E)	–	290/650	(0.5~400)ng·ml⁻¹	–		1,3
	Cu-1,1,3-[illegible]-1-丙烯	C		365/510	(0.1~0.5)μg·ml⁻¹	–	生物物质	1,3
	Cu-[illegible]B_6-H_2O_2				(1~100)ng·ml⁻¹	–		1
Dy	Dy-HFA-TOPO-TritonX-100	C	pH8	330/575	(0.8~20)μmol·L⁻¹	32.5	[illegible]稀土样品	6
	Dy-[illegible]-TOPO-TritonX-100	C	–	[illegible]	(0.08~5)μmol·L⁻¹	–	合成样	4
	Dy-乙醇-水杨酸	C	–	337.1/573	(0.1~100)μg·ml⁻¹	17	合成样	50
	Tb,Dy,Sm[illegible]EDTA-CTMAB	C	pH12.5	237/577	–	[illegible]	[illegible]氧化物	62

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(μg·ml⁻¹)	应用	文献
Dy	Tb,Dy-胺羧基二乙酸钛铁试剂 CTMAB	C	pH12	328/578	$(7\times10^{-4}\sim7)$μmol·L⁻¹	0.5nmol·L⁻¹	合成样	51
	Eu,Sm,Tb,Dy-吡啶-2,6-二羧酸	C	pH7.0	272/572	—	0.5	地质和环境试样	53
	Dy Gd-1,5-双(2'-苯基 3'-甲基 5'-氧代吡唑 4'-基)戊二酮(1,5) CTMAB	C	pH8	274/574	$(0.2\sim10^{3})$nmol·L⁻¹	0.08nmol·L⁻¹	合成样	49
	Dy-安替比林-水杨酸盐	C(E)			$(0.01\sim5)$μg·ml⁻¹	·		1
	Dy-3-甲基-1-(4-磺基苯基)-5-吡唑啉酮	C	pH7.5	/543	$(0.1\sim1)$μg·ml⁻¹	·		1,3
	Dy-吡啶-2,6-二羧酸	C		—	$(8\times10^{-3}\sim8\times10^{2})$μg·ml⁻¹	—		1
	Dy 钛试剂-EDTA	C	pH=12~13	/577	$(10^{-3}\sim1)$μg·ml⁻¹			1,3
	Dy 钛试剂-亚氨基二乙酸	C	—	/577	$(8\times10^{-4}\sim1.6\times10^{2})$μg·ml⁻¹			1,3
Eu	Eu Y_2O_3	F	熔融或溶光 谱	电子束/611		1		8
	Eu-TTA phen	C	pH7.8			40	地质样品	6
	Eu-TTA-TOPO-DDP	C	pH3.6	360/600	—	20		6
	Eu-phen 吐温 85	C	pH5.5	350/711		2		6
	Eu-TTA-phen-吐温 80	C	pH5.5	360/615	—	0.5		6
	Eu Gd-TTA-phen TritonX-100	C	pH=6.8~7.2	371/612	$(0.7\sim5.0\times10^{3})$μmol·L⁻¹	1.34×10^{-5}	稀土氧化物	6
	Eu-TOPO TritonX-100-二苯甲酰甲烷	C	pH=7.6~8.3	363/617	$(2\times10^{-4}\sim1.2\times10^{-2})$mol·L⁻¹	2.0×10^{-9}mol·L	氧化钆	6
	Nb-Sm-Eu-HFA-TOPO	C	pH8.0	—	—	0.76		6
	Eu-KCl	F	3mKCl	395/595	—	—		6
	Eu TTA-phen	C	—	氮分子激光 器	·	0.04		6
	Sm,Eu-TTA-TOPO-TritonX 100	C	pH7	360/612	$(1\sim30)$nmol·L⁻¹	0.016	合成样	4
	Sm,Eu-TTA-phen-TritonX-100	C	pH7	370/612	$(2\times10^{-2}\sim8)$nmol·L⁻¹	0.3×10^{-4}	合成样	4
		F	—	395/595	$(6\sim400)$μg·ml⁻¹	·	钐、钆、钇纯化物	4
	Eu 六氟乙酰丙酮 TOPO TritonX 100	C	—	330/612	$(1\sim500)$nmol·L⁻¹	10^{-1}nmol·L⁻¹	合成样	4
	Eu-La-TTA-TOPO-TritonX-100	C	--	360/617	$(1.0\times10^{-2}\sim4.5\times10^{3})$nmol·L⁻¹	—	混合稀土,稀土氧化物	4
	Eu 三氟乙酰丙酮 TOPO-TritonX 100	C	--	二举激光 光 谱	$(2\times10^{-12}\sim3\times10^{-7})$mol·L⁻¹		合成样	4
	Eu-Sm-苯甲酰丙酮-氯仿	C	pH=[illegible]·L⁻¹ NaOH	360/612	$(5\sim100)$ng·ml⁻¹	5.02	混合稀土氧化物	54
	Eu-Gd TTA TOPO TritonX-100	C	pH=6.08~7.15	360/615	$(1.0\times10^{-13}\sim1.0\times10^{-7})$mol·L⁻¹	1.0×10^{-1}nmol·L⁻¹ ~10^{-7}mol·L⁻¹	合成样	55
	(Tb,Gd,Y) Eu-TTA-N_{263}-TritonX-100	C	pH6.6	363/612.8	$(10^{-12}\sim10^{-7})$mol·L⁻¹	10^{-12}mol·L⁻¹	复杂样品	56
	Eu Y-二苯胍 丙酮 二苯甲酰甲烷	C	pH7.0	390/612	$(1.0\times10^{-15}\sim5.0\times10^{-7})$mol·L⁻¹	5.0×10^{-13}mol·L⁻¹	合成样品	57
	Eu-TTA-N_{263}-TritonX-100	C	pH8.6	363/612	$(0\sim35)$μg·ml⁻¹	0.9	包头混合稀土氧化物	5
	Eu-Gd-二苯甲酰甲烷-二乙胺 胡胶	C	pH9.2	391/613	$(10^{-6}\sim1)$μg·ml⁻¹	8.5×10^{-12}mol·L⁻¹	混合稀土氧化物	5
	Eu-NH₃ 丙酮-二苯甲酰甲烷	C	pH9.3	400/612	$(1.0\times10^{-12}\sim6.0\times10^{-8})$mol·L⁻¹	3.0×10^{-13}mol·L⁻¹	混合稀土氧化物	58
	Eu 酸氯钠盐 TritonX 100	C	pH9.0	330/612	$(1.0\times10^{-13}\sim8.0\times10^{-7})$mol·L⁻¹	6.0×10^{-14}mol·L⁻¹	混合稀土	59
	Eu-TTA 乳胶	C	pH7.3	375/612	$(1.0\times10^{-12}\sim4.0\times10^{-6})$mol·L⁻¹	1.5×10^{-12}mol·L⁻¹	混合稀土	60
	Eu Dy TTA 乳胶	C	pH7.5	375/612	$(1.0\times10^{-12}\sim1.0\times10^{-7})$mol·L⁻¹	1.2×10^{-12}mol·L⁻¹	混合稀土	60

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Eu	Eu-Ho-TTA-[illegible]	C	pH7.2	375/612	$(1.0\times10^{-9}\sim9.5\times10^{-7})$mol·L^{-1}	1.0×10^{-10}mol·L^{-1}	混合稀土	60
	Eu-La-苯甲酰三氟丙酮-CTMAB	C	pH=8.5~9.5	359/616	$(2.0\times10^{-10}\sim8.0\times10^{-8})$mol·L^{-1}	5.0×10^{-11}mol·L^{-1}	混合稀土氧化物	61
	Eu-Gd-苯甲酰三氟丙酮-CTMAB			358/616	$(1.0\times10^{-10}\sim4.0\times10^{-7})$mol·L^{-1}	2.0×10^{-11}mol·L^{-1}		
	Eu-Tb-苯甲酰三氟丙酮-CTMAB			359/616	$(1.0\times10^{-9}\sim8.0\times10^{-7})$mol·L^{-1}	1.0×10^{-10}mol·L^{-1}		
	Eu-Lu-苯甲酰三氟丙酮-CTMAB			360/616	$(2.0\times10^{-10}\sim5.0\times10^{-7})$mol·L^{-1}	2.5×10^{-11}mol·L^{-1}		
	Eu-Y-苯甲酰三氟丙酮-CTMAB			355/616	$(2.0\times10^{-10}\sim8.0\times10^{-8})$mol·L^{-1}	1.0×10^{-11}mol·L^{-1}		
	Eu-Sc-苯甲酰三氟丙酮-CTMAB			354/616	$(4.0\times10^{-10}\sim8.0\times10^{-8})$mol·L^{-1}	7.5×10^{-11}mol·L^{-1}		
	Eu-RE-2-(2,2-二苯基乙酰基)-1,3-茚满三酮-CTMAB	C	pH=8~9	330/616	$(1.0\times10^{-10}\sim6.0\times10^{-7})$mol·L^{-1}	6.0×10^{-11}mol·L^{-1}	混合稀土氧化物	62
	Eu,Sm,Tb,Dy-吡啶-2,6-二羧酸	C	pH7.0	272/615		10ng·ml^{-1}	纯度和环境试样	63
	Eu-TTA-α,α'-联吡啶-吐温-80	C	pH=5.3~5.4	342/613	(0.086~340)ng·ml^{-1}	0.1	混合稀土氧化物	5
	Eu,Sm,Tb-二苯甲酰甲烷-NH$_3$-丙酮	C	pH=9~9.5	400/612	(1~40)nmol·L^{-1}	0.5nmol·L^{-1}	合成样	55
	Eu,Lu-TTA-phen-TritonX-100	C	pH=6.0~6.9	371/612	(5~500)nmol·L^{-1}	0.91nmol·L^{-1}	合成样	64
	Eu,Sm-二苯甲酰甲烷-溴化十六烷基吡啶	C	pH9.5	355/614	(0.05~200)ng·ml^{-1}	—	高纯稀土氧化物	65
	Eu,Sm,Gd-二苯甲酰甲烷-CTMAB-TritonX-100	C	pH9.7	390/612	(0.1~10)nmol·L^{-1}	10^{-11}mol·L^{-1}	合成样	66
	Eu,Tb-吡啶-2,6-二羧酸	C	pH6.0	280/595	(1~600)ng·ml^{-1}	4	混合稀土氧化物	67
	Eu-HFA-TOPO-TritonX-100	C	pH3.0	315/614	$(8.0\times10^{-10}\sim1.0\times10^{-5})$mol·L^{-1}		稀土混合物	68
	Eu-Tb-吡啶-2,6-二羧酸	C	0.36mol·L^{-1} NaOH	272/615	(2~18)ng·ml^{-1}	0.2	合成样	69
	Eu-二甲基甲酰胺取乙醇	C	-	390/615	$(10\sim1.5\times10^{3})$μg·ml^{-1}	—		1,3
	Eu-5,5,6,6,7,7,7-七氟庚二酮-2,4-phen	C	—	—	(5~1)μg·ml^{-1}			1
	Eu-六氟乙酰丙酮-三辛基氧膦	C	—	—	$(3\times10^{-4}\sim1.5)$μg·ml^{-1}	—		1
	Eu-1,1,1,5,5,5-六氟-2,4-戊二酮	C	中性,95%乙醇	312/614	(1~80)μg·ml^{-1}	—		1,3
	Eu-2-[illegible]-4-甲氧基苯甲酰-5-羧酸	C			$(2\times10^{-5}\sim4)$μg·ml^{-1}			1
	Eu-2-萘甲酰三氟丙酮-三辛基氧膦	C	pH=5.5~6.5	/613	(0.02~0.1)ng·ml^{-1}	—		1,3
	Eu-phen-2-苯基辛可酸	C	—	—	(1~7)ng			1
	Eu-phen-水杨酸盐	C(E)	—	—	$(5\times10^{-3}\sim2.5)$μg·ml^{-1}	—		1
	Eu-2-萘酰丙二酮-1,3	C	—	—	(0.023~3.8)μg·ml^{-1}	—		1
	Eu-吡啶-2,6-二羧酸	C			(0.75~7.5)ng·ml^{-1}			1
	Eu-2-噻吩甲酰三氟丙酮	C			(0.5~500)ng·ml^{-1}			1
	Eu-2-噻吩甲酰三氟丙酮-[illegible]二苯胍	C(E)	pH6.1	374/611	(0.02~300)ng·ml^{-1}	—		1,3
	Eu-2-噻吩甲酰三氟丙酮-[illegible]氮三乙酸	C	pH8.5	365/611	(0.045~300)ng·ml^{-1}			1,3
	Eu-2-噻吩甲酰三氟丙酮-phen	C(E)	苯溶液	/612	(0.2~100)ng·ml^{-1}	—	光学玻石	1,3
	Eu-2-噻吩甲酰三氟丙酮-TOPO	C(E)			(0.04~760)ng·ml^{-1}			1
	Eu-1,1,1-三氟-5,5-二甲基己二酮-2,4-TOPO	C			$(1.6\times10^{-3}\sim1.5)$μg·ml^{-1}	—		1

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
F	F-Al-桑色素	Q	pH=2.2~2.6	424/496		5		6
	F-Al-铬光蓝	Q	pH=3~4	365/575	(5~300)ng·ml⁻¹	3	天然水	6
	F-Zr-8-羟基喹啉-5-磺酸	Q	pH3	363/505	—	2		6
	F-Al-羟基萘酚蓝	Q	pH4.5	590/650	(0~2.4)μg·ml⁻¹	50	大气	6
	F-Th-桑色素	Q	pH3	423/496	—	50		6
	F-Al-水杨基荧光酮	Q	pH5.5	495/525	(0~240)ng·ml⁻¹	—	自来水	5
	F-Al-7[(4-甲基-2-磺酸基苯)偶氮]-8-羟基喹啉-5-磺酸	Q	pH4.4	280/500	(0~600)ng·ml⁻¹	10.5	水样、牙膏	70
	F-Al-羊毛铬红B	S(Q)	pH4.5	—	$(4\times10^{-3}\sim2)$μg·ml⁻¹	—		2
	F-Al-8-羟基喹啉	S(Q)	pH4.7-$CHCl_3$	320/570	(10~400)ng·ml⁻¹	—		1,3
	F-Al-桑色素	S(Q)	pH4.5	365/500	(2~350)ng·ml⁻¹			2
	F-Al-吡啶偶氮-2-萘酚	S(Q)	—	—	(0.2~20)μg·ml⁻¹	—		1
	F-Al-铬紫酸红Y	S(Q)	pH6.5	—	$(4\times10^{-3}\sim2)$μg·ml⁻¹			1,2
	F-Mg-8-羟基喹啉	S(Q)	—	420/530	(0.2~1.6)μg	—		1,3
	F-Th-桑色素	S(Q)	酸性介质	420/510	(2.5~150)ng·ml⁻¹	10^{-6}mol·L⁻¹	生物试样	1,2,3
	F-Zr-钙黄绿素蓝	C	pH2.5	350/410	(8~60)ng·ml⁻¹			2
	F-Zr-3-羟基黄酮	S(Q)	pH1.78	380~395/460	(2~150)ng·ml⁻¹			1,2
Fe	Fe-水杨基荧光酮-CTMAB	C	pH5.4	紫外/538	(0~200)ng·ml⁻¹	20	天然水、铝合金、试剂	6
	Fe-CTMAB-二溴苯基荧光酮	C	pH6.5	363/560		2		6
	Fe-MNEAA-TOPO	C		240/360	(20~100)ng·ml⁻¹		天然水	4
	Fe-3,5-二溴水杨基荧光酮	C	pH=1.6~2.4	310/510	(20~250)ng·ml⁻¹	10	铝合金、镁制剂	71
	Fe-H_2O_2-8-苯胺基-1-萘磺酸-Brij-35	Cat	HCl介质	350/515	(5~800)ng·ml⁻¹	2	人发、茶叶、铝合金	72
	Fe-四亚乙基五胺-H_2O_2-还原型二氯荧光素	Cat	pH7.5	505/521	(0.4~12)ng·ml⁻¹	0.13	人发、指甲、血清、面粉	73
	Fe-Al-铬蓝黑R	C(Q)	微酸性	400/590	(30~200)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Fe-苯基-2-吡啶酮-2-吡啶腙-BrO_3^-	R,C	—	290/352	(70~300)ng·ml⁻¹	60		1,3
	Fe-1,4-二羟基-2,3-二氰基萘	R	pH3.4	402/470	(50~800)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Fe-高香草酸-H_2O_2-过氧化物酶	Enz			(2~60)μg·ml⁻¹			1
	Fe-2-羟基苯甲醛-H_2O_2-Ag(Ⅰ)	Cat	—	—	(50~170)ng·ml⁻¹	—		1
	Fe-3-吲哚氧基乙酸盐-辣根过氧化酶	Enz	—	—	(0.2~12)μg·ml⁻¹	—		1
	Fe-4'-(4-甲氧基苯基)-2,2',2''-三联吡啶	C(Q)	—	—	(10~100)μg·ml⁻¹	—		1
	Fe-phen-曙红	C(E)	—		(0.1~5)μg·ml⁻¹	—		1
	Fe-邻苯二甲酸氢钾-锌试剂	R	—	/415	(1~400)ng·ml⁻¹	—	海水	1,3
	Fe-4,4'-二氨基(N,N,N',N'-四乙酸)茋-2,2'-二磺酸-H_2O_2	Cat	—	/450	(2~200)ng·ml⁻¹	—	水、LiCl、$CaCl_2$	1,3
	Fe-2,2',2''-三联吡啶	C(Q)	pH3.6	313/350	(15~300)ng·ml⁻¹			1,3
	Fe-H_2O_2-二苯胺磺酸钠	Cat	pH6	530/485	(6~320)ng·ml⁻¹	12	天然水	74

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	检出限/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
Ga	Ga-CTMAB-8-羟基喹啉	C	pH7.3	/530	—	0.5		6
	Ga-桑色素-CTMAB	C	pH=1.3~1.7	430/498	—	0.5		6
	$GaCl_4^-$-丁基罗丹明B	C	—	572/584	(4~50)ng·ml⁻¹	1	纯金属、矿样	4
	Ga-2-(5'-溴基-2'-羟基苯偶氮)-4-乙氨基-5-甲酚	C	pH 3.8~5.0	515/565	(2×10⁻⁸~2×10⁻⁶)mol·L⁻¹	2×10⁻⁹ mol·L⁻¹	半导体、合金、刀钢	4
	Ga-亚水杨基-邻-氨基苯酚-十二烷基磺酸钠	C	pH4.35	416/528	(0.1~5)μmol·L⁻¹		合成样	6
	Ga-水杨醛缩甲酰胺	C	pH3.8	395/450	(0~100)ng·ml⁻¹	0.4	合成样、标准物质样	5
	Ga-桑色素-十二烷基硫酸钠-Triton X-100	C	pH3.7	400/510	(2~180)ng·ml⁻¹	1.7	矿石试样	5
	$GaCl_4^-$-丁基罗丹明	C	6mol·L⁻¹ HCl	470/570	(0~1.4)μg·ml⁻¹	2	矿样、废水	75
	Ga-邻羧苯基荧光酮-CTMAB-β-CD	Q	pH=3.8~5.0	400/510	(4~80)ng·ml⁻¹	2.4	矿石试样	76
	Ga-吖啶橙-Cl⁻	C(E)	—		(7~100)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-茜素红S	C	—		(0.2~2)μg·ml⁻¹	—		1
	Ga-双安替比林-杨酮	C(E)			(10~100)ng·ml⁻¹			1
	Ga-水杨醛-2-羧苯酮-2-吡啶基腙	C	—	—	(1.4~350)ng·ml⁻¹			1
	Ga-4-(5-氯-2-羟基苯偶氮)间苯二酚	C(E)	—	-	(2.5~4.0)μg·ml⁻¹	—		1
	Ga-5,7-二碘-8-羟基喹啉	C(E)	—	/540	(40~150)ng·ml⁻¹	200		1,3
	Ga-2,4-二羟基苯甲醛缩氨基脲	C	—		(4~400)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-3,3'-二羟基荧光酮	C	pH=2.6~3.7	493/578	—	1		1,3
	Ga-羊毛铬红B	C	酸性介质	/570	(0~0.2)μg·ml⁻¹			1,3
	Ga-2-羟基-1-萘甲醛缩氨基硫脲	C(E)	—	365/440	(0.02~1)μg·ml⁻¹		铝、铝合金	1,3
	Ga-2-羟基-5-氯苯甲醛缩氨基硫脲	C	—	-	(4~230)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-2-羟基-5-甲基苯甲醛缩氨基硫脲	C	—	—	(3~280)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-2-羟基-1-萘甲醛缩氨基脲	C		412/470	(0~0.7)μg·ml⁻¹	—		1,3
	Ga-4-羟基-3-(2-羟基-4-甲氧基苯偶氮)苯磺酸	C	—	488/575 500/570	(80~800)ng·ml⁻¹			1,3
	Ga-4-(2-羟基苯偶氮)间苯二酚	C	—	—	(20~480)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-8-羟基喹哪啶	C(E)	pH 3.9~9	/492	(1~100)ng·ml⁻¹		岩石、半导体级、纯铝	1,3
	Ga-8-羟基喹啉	C(E)	—	405/520	(20~600)ng·ml⁻¹	—	硅酸盐岩石	1,3
	Ga-荧光镓	C	—	500/590	(1~80)ng·ml⁻¹	2	钢、铝盐	1,3
	Ga-桑色素试剂	C	—	—	(3~390)ng·ml⁻¹			1
	Ga-媒染蓝3R	C	pH4	340/500	(40~480)ng·ml⁻¹			1,3
	Ga-2-(2'-吡啶基)苯并咪唑	C	—	-	(70~700)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-2-吡啶醛-2-呋喃甲酰腙	C		—	(4~50)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-磺酸-β-萘酚B	C		—	(5.0~170)ng·ml⁻¹	—		1
	Ga-8-羟基喹啉硫酸	C	pH3.0	365/505	(20~600)ng·ml⁻¹		铝合金	1,3
	Ga-罗丹明B-Cl⁻	C(E)	—	/565	(1.5~230)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Ga-罗丹明6G-Cl⁻,Br⁻	C(E)		557/572	—	0.5		1,3

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Ga	Ga-罗丹明 6G-Cl$^-$	C(E)	-	550/556	(2~160)ng·ml^{-1}	0.8		1,3
	Ga-亚水杨基-o-氨基苯酚	C(E)	—		(30~600)ng·ml^{-1}	—		1
	Ga-o-(亚水杨基氨基)-2-羟基苯磺酸	C	—	—	(2~400)ng·ml^{-1}	—		1
	Ga-N-亚水杨基-2-羟基-4-羧基苯胺	C	—	—	(1~240)ng·ml^{-1}			1
	Ga-N-亚水杨基-2-羟基-5-羧基苯胺	C	—	—	(4~260)ng·ml^{-1}	—		1
	Ga-N-亚水杨基-2-羟基-5-磺基苯胺	C	pH 3.7~3.9	415/500	(2~200)ng·ml^{-1}	—	高纯 Al	1,3
	Ga-6-(4-甲基-亚水杨基氨基)-m-甲苯酚	C			(4~280)ng·ml^{-1}	—		1
	Ga-桑色素 AS	C(E)	—	—	(10~800)ng·ml^{-1}	10		1
	Ga-铬变酸红 ERS 或铬 WEFA	C	—	—	(10~80)ng·ml^{-1}	—		1
	Ga-偶氮羟基磺酸氯间苯二酚	C	pH3	-	(3~15)ng·ml^{-1}	—	矿石、煤、铝、锌、渣	1,3
	Ga-坚牢媒介红 Y	C	pH3	565	(0.02~12)μg·ml^{-1}	—		1,3
	Ga-3,4,5,7-四羟基黄酮	C	—	—	(2~24)ng·ml^{-1}			1
Gd	Gd-乙二醇二乙醚二胺四乙酸	C	pH=4.0~6.0	272/310		200	稀土分离富集的稀土氧化物	77
	Gd-一缩二甘醇酸	C	pH5.5	271/310	(0.16~100)μg·ml^{-1}	100		78
	Gd-罗丹明 B-水杨酸	C(E)	—	—	(0.12~1.2)μg·ml^{-1}	—		1
Ge	Ge-溴代苯基荧光酮-CTMAB	C	pH4.2(NaAc-HAc)	400/510		0.3		6
	Ge-三溴苯基荧光酮	C	9mol·L^{-1}HCl	420/510	(0~10)μg·ml^{-1}	50	煤、渣、合金	4
	Ge-二硫基磺酸钠-桑皮素	C	1.9mol·L^{-1}HCl	423/456	(0~1.6)μg·ml^{-1}	2	矿样	4
	Ge-桑色素	C	(1.8~2.53)mol·L^{-1}H$_3$PO$_4$	425/489	(1.0~25)ng·ml^{-1}	0.2	水、保健饮料	5
	Ge-桑色素	C	H$_3$PO$_4$介质	425/486	(0~1)μg	0.40	淡菜	79
	Ge-桑色素	C	5.4mol·L^{-1}H$_3$PO$_4$	365/458	(0~250)μg·ml^{-1}	0.49	植物	80
	Ge-苗素配位体-罗丹明 6G	C	—	543	(2~100)ng·ml^{-1}			1,3
	Ge-桑褐	C			(10~70)ng·ml^{-1}	—		1
	Ge-羟基苯乙酮	C	浓 H$_2$SO$_4$或 H$_3$PO$_4$		—	10		1,3
Hf	Hf-Zr-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH 中性	—	—	1		6
	Hf-桑皮素	C	8.2mol·L^{-1}HClO$_4$	451/556	—	3		6
	Hf-[illegible]	C	pH2.5	430/530	(2~120)ng·ml^{-1}	—		4
	Hf-桑皮素-EDTA	C	3.5mol·L^{-1}NH$_3$+H$_2$O	453/536	(0.09~3.79)μg·ml^{-1}	2.87	铝合金	5
	Hf-3-羟基黄酮	C	—	-	(16~360)ng·ml^{-1}			1
	Hf-桑色素	C	—	—	(4~24)ng·ml^{-1}			1
	Hf-[illegible]	C			(20~200)ng·ml^{-1}	—		1
	Hf-[illegible]	C	—	—	(1~3)ng·ml^{-1}			1
	Hf-桑褐	C	55%HClO$_4$	366/458	(10~120)ng·ml^{-1}	—	锆铪混合物	1,3
	Hf-[illegible]	C	—		(0.2~0.5)ng·ml^{-1}	-		1
	Hf-[illegible]	C		-	(20~140)ng·ml^{-1}			1
Hg	Hg-丁基罗丹明 B-[illegible]-Br$^-$	S	0.1mol·L^{-1}H$_3$PO$_4$	365/520		2×10^{-5}		6

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Hg	Hg-Cu-钙黄绿素交换反应	C	pH9.2	498/520	—	0.72		6
	Hg-咪唑-Cu-α,β,γ,δ-四(4-磺苯基)卟吩	Cat	pH9	汞灯/614	—	0.4		6
	Cu-Hg-α,β,γ,δ-四(4-磺苯基)卟吩	Cat	—	汞灯/644	(0.4~8.0)ng·ml^{-1}	—	尿	4
	Hg-维生素 B_1	C	pH7.7	375/440	(0~0.8)μg·ml^{-1}	—	废水	4
	Hg-铜试剂-丁基罗丹明B-Br^-	S	pH=6~8	567/579	(2.5~500)ng·ml^{-1}	2.5	河水	81
	Hg-硫化荧光素汞	S	中性或弱酸性	498/515	(0.05~0.25)μg·ml^{-1}	1	大气,水,土壤	82
	Hg-丁基罗丹明B-Br^--树脂类	C	—	—	(3~300)ng·ml^{-1}	—		1
	Hg-2,2'-二吡啶酮腙	Cat	—	—	(80~320)ng·ml^{-1}	—		1
	Hg-硫脲胺酸钠双硫卡腙	C(Q)	pH4.5	340/470	(30~200)ng·ml^{-1}	10		1,3
	Hg-phen-曙红	C(E)		—	(50~1000)ng·ml^{-1}	—		1
	Hg-倩宁G-Br^-	C(E)	—	—	(20~200)ng·ml^{-1}	—		1
	Hg-罗丹明B-Cl^-	C(E)	苯-乙醚(2+1)	/590	(25~1000)ng·ml^{-1}	—	矿物	1,3
	Hg-罗丹明B-Br^-	C(E)	苯萃取	560/590	(1.6~16)ng·ml^{-1}			1,3
	Hg-罗丹明B-I^-	C(Q)			(1~10)μg·ml^{-1}	—		1
	Hg-罗丹明6G-I	C(E)	苯-环己烷	365/560	(0.4~1.6)μg·ml^{-1}	—	废水,污水	1,3
	Hg-硫胺素	R(E)	pH7.2	375/440	(10~500)ng·ml^{-1}	—		1,3
H_2O_2	HRP催化下氧化对羟基苯乙酸生成对羟基苯乙酸的二聚物	Cat	pH5.5	320/400	—	0.4(水相) 0.03(气相)	大气,降水	6
	H_2O_2-对羟基苯乙酸	R	—	325/375	$(1\times10^{-7}\sim8\times10^{-5})$mol·L^{-1}	0.02	大气	4
	H_2O_2-过氧化物酶-对羟基苯乙酸	R	HCl介质	320/400	$(1\times10^{-7}\sim8\times10^{-5})$mol·L^{-1}		大气,水	4
	H_2O_2-Mn-meso-四(N-甲基-4-吡啶基)卟啉-HVA	R	pH=9.5~11.0	315/424	$(1.3\times10^{-7}\sim2.4\times10^{-5})$mol·L^{-1}	1.3×10^{-7}mol·L^{-1}	葡萄糖	4
	H_2O_2-Fe-meso-四(N-甲基-3-吡啶基)卟啉-HVA	R		317.5/424	$(0\sim3.6\times10^{-6})$mol·L^{-1}	1.1×10^{-7}mol·L^{-1}	血清	4
	H_2O_2-葡萄糖-Mn-meso-四(4-三甲铵苯基)卟啉	R	—	319/406			—	4
	H_2O_2-HVA-Mn-$TPPS_4$	R	0.05mol·L^{-1}NaOH	318/424	$(0\sim2.5\times10^{-6})$mol·L^{-1}	8.5×10^{-8}mol·L^{-1}	葡萄糖	81
	H_2O_2-4-氨基-1H-1,5-苯并二吖庚因-3-腈盐酸化物-过氧化物酶	Enz	—		(20~400)ng·ml^{-1}		—	1
	H_2O_2-二乙酰二氯荧光素-过氧化物酶	Enz	pH7.2	—	(1~10)ng·ml^{-1}	—		1,3
	H_2O_2-3-(4-羟基苯基)丙酸-过氧化物酶	Enz	—		(1~100)ng·ml^{-1}			1
I^-	卟啉锌猝灭固定于增塑的PVC膜中荧光	Q	0.2mol·L^{-1}HCl	388/395	$(2.25\times10^{-7}\sim1.04\times10^{-5})$mol·L^{-1}		食盐	5
	I-二氯荧光素-氯化十六烷基吡啶	Q	pH=2.8~3.1	538/540	(32~80)ng·ml^{-1}	12	海水,食盐	5
	I-二乙酰荧光素	S(Q)	pH8.3	499/519	(0.035~0.4)μg·ml^{-1}	—		2
	I-10-(3-氯化丙基)吖啶	C	—		(0.48~1)μg·ml^{-1}			1
	I-乙酸双氧铀	S(Q)	NaOH	365/520	(0.02~0.2)μg·ml^{-1}			1,2
	I-Ce-As	R	H_2SO_4	260/530	(4~25)ng·ml^{-1}	—		2

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
IO_3	IO_3^--铬红紫素	R			$(0.2\sim2)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
Ir	Ir-2,2',2''-三联吡啶	C	pH8,$CHCl_3$萃取	365/520	$(2\sim20)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1,2
In	$InBr_4^-$-丁基罗丹明B	C	苯萃取	510/550	—	10	合金,矿石	6
	In-大麻双花素	C	—	—	$(5\sim110)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	In-8-羟基喹啉	C	苯萃取,pH=5~6	/520	$(0.2\sim2)\mu g\cdot ml^{-1}$			1,5
	In-8-羟基喹啉-四苯硼酸盐	C(E)	—	—	$(0.02\sim2)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	In-[illegible]	C(E)			$(4\sim40)ng\cdot ml^{-1}$			1
	In-荧光镓试剂	C			$(80\sim400)ng\cdot ml^{-1}$			1
	In-2-(2'-吡啶基)苯并咪唑	C(E)	—	—	$(0.01\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	In-[illegible] Bi-Pr	C(E)	—	—	$(5\sim40)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	In-桑椿	C		—	$(10\sim920)ng\cdot ml^{-1}$			1
	In-罗丹明B-Br^-	C(E)	$5mol\cdot L^{-1}H_2SO_4$,苯萃取		$(3\sim450)ng\cdot ml^{-1}$			1,3
	In-罗丹明3B-Br^-	C(E)	—	—	$(3\sim880)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	In-罗丹明6J-Br^-	C(E)	—	—	$(260\sim430)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	In-[illegible]	C(E)		—	$(20\sim180)ng\cdot ml^{-1}$			1
	In-3,4',5,7-四羟基黄酮	C	—	—	$(3\sim1.7\times10^3)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	In-水杨醛缩氨基硫脲	C(E)	pH5.3	385/450	$(0\sim0.4)\mu g\cdot ml^{-1}$			1,3
	In-过氧化物酶红Y	C	—		$(0.2\sim1.8)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
K	K-苯胺基萘磺酸盐-苯并18-冠-6	C(E)	1,2-二氯甲烷萃取	377/468		10^3		1,3
	K-曙红-18-冠-6	C(E)	—	—	$(0.01\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
La	La-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH8.5(NaAc-HAc)	380/510		51		6
	La-2-(1-安替比林偶氮)-5-羟基苯胺-水杨酸	C	pH 8.0~9.5	310/495	$(10\sim260)ng\cdot ml^{-1}$	10		54
	La-8-羟基喹啉-5-磺酸-十六烷基甲基铵离子	C	—		$(1\sim20)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	La-1-(二羧基甲基氨基甲基)-2-羟基-3-萘甲酸	C	—	—	$(0.3\sim1.1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	La-罗丹明B-3,5-二碘水杨酸	C(E)			$(2\times10^{-4}\sim3)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
Li	Li-二苯并噻唑甲烷	C	二噁烷	365/415	$(0.05\sim2)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	NaCl,KCl,$SrCl_2$	1,3
	Li-5,7-二氯-8-羟基喹啉	C	碱性乙醇溶液	紫外光/530	$(0.25\sim25)\mu g\cdot ml^{-1}$			1,3
	Li-1,4-二羟基蒽醌	C			$(50\sim500)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Li-1,5-二羟基蒽醌	C			$(50\sim650)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Li-1,8-二羟基蒽醌	C	—		$(50\sim700)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Li-8-羟基喹啉	C	碱性乙醇溶液	紫外光/(490~570)	$(0.04\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	矿物	1,3
Lu	Lu-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH 6.3~8.5	381/501	$(0\sim879)ng\cdot ml^{-1}$	9.3	混合稀土	5
	Lu-双(8-羟基-2-喹啉基)甲胺	C	—	—	—	—		1
	Lu-1-(二羧基甲基胺甲基)-2-羟基-3-萘甲酸	C	—		$(0.05\sim1.4)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Lu	Lu-桑色素-二安替比林甲烷	C(E)	$CHCl_3$ 萃取	420/525	(0.02~10)μg·ml^{-1}	—		1,3
	Lu-桑色素	C(E)	—	·	(1.5~40)μg·ml^{-1}			1
Mg	Mg-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH6.5	395/515	(0~2)μg·ml^{-1}	5	纯试剂	6
	Mg-铬试剂-CTMAB	C	pH8.5	400/500	(0~40)ng·ml^{-1}	2	纯试剂	6
	Mg-5-羟基黄酮	C	pH8.5	442/530	(0~5)mmol·L^{-1}	—	血清	5
	Mg-7-(5-羟基喹啉-5-磺基-7-偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH5.9	515/[illegible]	(0~480)ng·ml^{-1}	1.9	水样、矿样	5
	Mg-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH6.32	370/500	(0.03~2.52)ng·ml^{-1}	·	腹膜透析液	5
	Mg-7-(2'-羟基萘偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH10.20	262/488	(0~1500)ng·ml^{-1}	5.12	合金	85
	Mg-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH6	357/577		2	水、血清、食物	24
	Mg-双(亚水杨基氨基)-乙烯二胺	C(E)	pH10.5	475/545	(2~200)ng·ml^{-1}	—	水、血浆、尿	1,3
	Mg-双亚水杨基乙二胺	C	N,N'-二甲基甲酰胺	459	(0.11~35)μg·ml^{-1}	25	水、Li_2CO_3、$CaCl$	1,3
	Mg-1-双羧基甲基氨基甲基-2-羟基-3-萘甲酸	C	pH=10.5~12	—	—	·	地下水、海水	1
	Mg-1,5-二羟基蒽醌	C	—	—	(10~100)ng·ml^{-1}			1
	Mg-1,6-二羟基蒽醌	C	-	-	(60~500)ng·ml^{-1}	·		1
	Mg-2,2'-二羟基偶氮苯	L	pH=11.0~12.2	紫外光/480	(0.1~0.5)μg·ml^{-1}	·	岩石、水泥、血清	1,3
	Mg-2-苯甲酰-2-吡啶腙	C	—	—	(0.4~1.2)μg·ml^{-1}	—		1
	Mg-3-羟基-2-萘甲酸醛	C	—	—	(9~45)ng·ml^{-1}			1
	Mg-1-(8-羟基喹啉-7-偶氮)-2-萘酚-4-磺酸	C	pH10	—	—	10		1
	Mg-荧光镁试剂	C	pH10	紫外光/530		4		1,3
	Mg-桑色素	C	pH9.65	405/495	(0.1~0.5)μg·ml^{-1}			1,3
	Mg-水杨醛缩乙二胺	C	-	-	(20~100)ng·ml^{-1}	·		1
	Mg-5,10,15,20-四(1-甲基吡啶-4-基)卟啉	C	—	—	(3.0~72)ng·ml^{-1}			1
	Mg-3,3',4'-三羟基黄酮	C		·	(0~6)μg		—	1
Mn	Mn-IO_4^--罗丹明6G	Cat		530/560		0.2		5
	Mn-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	H_3PO_4介质	374/474		2		5
	Mn-CTMAB-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	[illegible]H_2SO_4 2.5ml	370/490		·		5
	Mn-KIO_4-罗丹明	Cat	pH2.4	420/550	(0~0.7)μg·ml^{-1}	0.047	水、饮用水、头发	4
	Mn-PbO_2-桑色素	Cat		421/540	(0~500)ng·ml^{-1}	—	天然水	4
	Mn-KIO_4-荧光素-氨三乙酸	Cat	pH4.5	500/510	(0.1~0.9)μg·ml^{-1}	0.002	天然水	4
	Mn-2-(8-羟基喹啉-5-磺酸-7-偶氮)-变色酸	Cat	[illegible] 5.0ml	375/463	(0~10)ng·ml^{-1}	0.055	铝合金、污染物	7
	Mn-2-(5'-羟基喹啉-5-磺基-7'-偶氮基)-1-羟基-8-氨基-萘二磺酸	Cat	pH=[illegible]~12.0	230/115	(0~8.0)ng·ml^{-1}	—	铝合金	5
	Mn-KIO_4-meso-四(4-三甲铵基苯基)卟啉-氨三乙酸	Cat	pH=4.0~5.0	412/644.5	(0.4~1.6)ng·ml^{-1} (0.01~0.4)μg·ml^{-1}	0.031	铝材	4

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	检出限/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
Mn	Mn-KIO_4-罗丹明6G-氨三乙酸	Cat	pH6.8	348.4/548.3	(0.04~1.00)ng·ml⁻¹	0.018	人发、尿、血、水样	5
	Mn-KIO_4-邻菲罗啉-吖啶红Y	Cat	pH3.8	400/510	(0~5.1)μg·ml⁻¹	0.36	铝合金、钢样	5
	Mn-$TPPS_4$-Hg-KI	Q	pH=9.1~12.0	415/460	(0~80)ng·ml⁻¹	2.5	茶水	5
	Mn-H_2O_2-吡啶醛异烟腙	Cat	pH8.5	330/440	(0~50)ng·ml⁻¹	0.05	水样	5
	Mn-KIO_4-罗丹明6G-氨基二乙酸	Cat	pH=3.3~4.3	365/560	(0.8~20)μg·ml⁻¹	0.2	自来水、茶叶、铝合金	86
	Mn-钙黄绿素蓝	Q	pH 9.5~10.0	368/446	(5~100)μg·ml⁻¹	5	茶叶	87
	Mn-8-羟基喹啉-5-磺酸钠-$NaIO_4$	Cat	pH=4.9~6.5	355/492	(5~200)ng·ml⁻¹	1	茶叶、矿样、水	88
	Mn-7-(8-羟基喹啉-3,6-二磺基偶氮)-8-羟基喹啉-5-磺酸-K	C	pH9.5	240/378	(0~2.9×10⁻⁷)mol·L⁻¹	3×10⁻⁹mol·L⁻¹	合成样、粮食	89
	Mn-硫胺素-$NaIO_4$-氨三乙酸	Cat	0.036mol·L⁻¹HCl	370/440	(8.2~10³)ng·ml⁻¹	0.4	纯铝、铝合金	90
	Mn-KIO_4-还原型罗丹明B	Cat	pH=2.65~2.80	565.8/581.8	(0.08~2.0)ng·ml⁻¹	0.026	K_2SO_4	91
	Mn-3,3'-二氧代吉罗姆酸盐-过氧化物酶	Em	pH8.0	322/413	(0.44~2.7)μg·ml⁻¹	6μmol·L⁻¹	合成海水	1,3
	Mn-2-羟基苯甲醛缩氨基硫脲-H_2O_2	Cat	—	355/440	(2~9)ng·ml⁻¹	—	水、牛奶、啤酒、苹果	1,3
	Mn-3-羟基喹啉-5-磺酸	R	(0.5~1)mol·L⁻¹ H_2SO_4	375/485~490	(2.5~2×10³)ng·ml⁻¹	—	钢样	1,3
	Mn-1,10-邻菲罗啉-曙红	C(E)	—	—	(0.1~1)μg·ml⁻¹			1
	Mn-高香草醛-H_2O_2-过氧化物酶	Em	—		(0.3~12.5)μg·ml⁻¹	—		1
Mo	Mo-水杨基荧光酮	Q	0.2mol·L⁻¹ H_2SO_4	498/581	(2~800)ng·ml⁻¹	1	合金钢	6
	Mo-罗丹明B-SCN⁻-PVA	Q	10mol·L⁻¹ H_2SO_4 2ml	352/585	—	—		6
	Mo-9-芳基取代荧光酮-CTMAB	Q	1mol·L⁻¹ H_2SO_4 4.5ml	493/515	—	4		5
	Mo-二溴苯基荧光酮	C	(0.7~1.3)mol·L⁻¹HCl	450/550	(0~3.0)μg·ml⁻¹	20	钢样	4
	Mo-罗丹明6G	Q	—	350/550	(0~50)ng·ml⁻¹	—	钢样	4
	Mo-邻氯苯基荧光酮-吐温80	Q	—	350/530	(0~60)ng·ml⁻¹	—		4
	Mo-SCN⁻-罗丹明B-十二烷基苯磺酸钠	Q	10mol·L⁻¹ H_2SO_4 1.5ml	354/600	(5~100)ng·ml⁻¹	1.4	合金钢、矿石	5
	Mo-SCN⁻-吡罗红G	R	5ml浓盐酸	528/552	(0~50)ng·ml⁻¹	—	自来水、尿	5
	Mo-罗丹明6G-H_2O_2-KI	Cat	pH7	349.7/549.8	(2~10)ng·ml⁻¹	1.2	豆类、人发	92
	Mo-二溴羟基苯基荧光酮-CTMAB	Q	(2~8)mmol·L⁻¹ H_3PO_4	470,508/528	(1.2~20)ng·ml⁻¹	1.2	合金钢	93
	Mo-5'-硝基水杨基荧光酮-Triton X-100	Q	6mmol·L⁻¹ H_2SO_4	502/533	(0~0.5)μg·ml⁻¹	4		94
	Mo-邻氯苯基荧光酮-CTMAB	Q	pH=4~6	365/547	(2~50)ng·ml⁻¹	1.3	合金	95
	Mo-胭脂红酸	C(E)	pH5.2	560/590	(0.1~0.8)μg·ml⁻¹	—	浆钢	1,3

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/($ng \cdot ml^{-1}$)	应用	文献
Mo	Mo-桑色素	C	—	—	$(0.1\sim1.6)\mu g \cdot ml^{-1}$	—		1
	Mo-8-羟基喹啉-H_2O_2-四苯基硼酸盐	C(T)	—	—	$(0.02\sim1)\mu g \cdot ml^{-1}$	—		1
	Mo-罗丹明B-SCN^-	C(Q)	—	350/578	$(2\sim200)ng \cdot ml^{-1}$	—	植物	1,3
Nb	Nb-桑色素-CTMAB	C	5mol·L^{-1} H_2SO_4 1ml	431/505	—	0.27		6
	Nb-桑色素-CTMAB	L	—	455/493	$(2\sim0.5)\mu g \cdot ml^{-1}$	2	岩矿	4
	Nb-二溴苯基荧光酮-CTMAB	Q		472/562	$(0.1\sim0.6)\mu g \cdot ml^{-1}$	—	铁矿	4
	Nb-水杨基荧光酮-CTMAB	Q	—	465/510	$(8\sim40)ng \cdot ml^{-1}$	—	铁矿	4
	Nb-桑色素-氯化十六烷基吡啶	C	1.5mol·L^{-1} HCl	420/470	$(0.3\sim3.2)\mu g \cdot ml^{-1}$	6.1	地质试样	5
	Nb-4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	C	0.36mol·L^{-1} H_2SO_4	420/470	$(0\sim240)ng \cdot ml^{-1}$	—	钢样	96
	Nb-荧光镓试剂-H_2O_2或F	C	—	—	$(0.1\sim3.5)\mu g \cdot ml^{-1}$	—		1
	Nb-荧光镓试剂-草酸盐	C	pH=5~6.5	紫外光/620	$(0.1\sim0.25)\mu g \cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Nb-桑色素-H_2O_2	C	—	—	$(4\sim400)ng \cdot ml^{-1}$	—		1
	Nb-槲皮素-H_2O_2	C	pH2.1(乙醇)	436/495, 50%	$(0.1\sim0.9)\mu g \cdot ml^{-1}$			1,3
	Nb-磺基萘酚偶氮间苯二酚-H_2O_2	C(E)	—	—	$(40\sim400)ng \cdot ml^{-1}$			1
	Nb-磺基萘酚偶氮间苯二酚-F^-或单宁盐、酒石酸盐	C(E)	—		$(40\sim400)ng \cdot ml^{-1}$			1
NH_3	NH_3-邻苯二醛-β-巯基乙醇	C	—	370/425	—	0.4	大气	1
	NH_3-甲醛-二酮	C	—	—	$(10\sim250)ng \cdot ml^{-1}$			1
	NH_3-荧胺	C	—	390/470	$(0.01\sim1)\mu g \cdot ml^{-1}$			1,3
	NH_3-酮戊二酸-NADH-谷氨酸脱氢酶	Enz(Q)		—	$(0.017\sim0.85)\mu g \cdot ml^{-1}$	—		1
	NH_3-邻苯二醛	C			$(?\sim4\times10^2)ng \cdot ml^{-1}$	0.12	空气,水	1
	NH_3-邻苯二醛	C	—	—	$(3.4\sim1.7\times10^3)ng \cdot ml^{-1}$	—	大气	1
Ni	Ni-Cd-$TPPS_4$	Q	pH5.8	/545	—	10		6
	Ni-钙黄绿素	C	pH12	495/520	—	—		6
	Ni-Cd-$TPPS_4$	S	—	365/654	$(0\sim5.0)\mu g \cdot ml^{-1}$	—	合金钢	4
	Ni-邻羟基苯基荧光酮-H_2O_2	Cat	—	460/510	—	0.02	合金钢	4
	Ni-1-(2-吡啶偶氮)-2-萘酚	C(Q)	—	550/570	$(0.06\sim6)\mu g \cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Ni-苄基-2-吡啶酮-2-喹啉腙-H_2O_2	R,C	—	290/362	$(50\sim350)ng \cdot ml^{-1}$	10		1,3
	Ni-1,10-邻菲啰啉-曙红	C(E)	—	—	$(0.1\sim1)\mu g \cdot ml^{-1}$	—		1
NO_2^-	NO_2^--间苯二酚	R	pH=9~10.7	550/583		5.8		5
	NO_2^--[illegible]	R	0.2mol·L^{-1} HCl	348/430	$(0\sim100)ng \cdot ml^{-1}$	0.94	湖泊水,海水	6
	NO_2^--藏红G	R	(2.0~2.4)mol·L^{-1} H_2SO_4	/549	$(0\sim0.14)\mu g \cdot ml^{-1}$	30	井水	97
	NO_2^--2-乙氧基-6,9-二氨基吖啶乳酸盐	C	—	316/496	$(0\sim100)ng \cdot ml^{-1}$	0.04	天然水	4

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
NO_2^-	NO_2^--$KMnO_4$-[illegible]	R	0.25mol·L^{-1} H_2SO_4	370/470	(0~50)ng·ml^{-1}	2.5	硝酸盐、水、肉制品	4
	NO_2^--$KBrO_3$-罗丹明6G	Ca.	2.1mol·L^{-1} H_3PO_4	348/548	(0.07~7.4)ng·ml^{-1}	0.074	饮用水、饮料	102
	NO_2^--2,3-二氨基萘	R	pH 2	364/410	(0~2)μg·ml^{-1}	0.4	天然水	103
	NO_2^--色氨酸	R	(0.06~3.00)mol·L^{-1} NaOH	320/380	(10~260)ng·ml^{-1}	1	水样、食盐	5
	NO_2^--[illegible]宁G	R(Q)	(2.0~5.4)mol·L^{-1} H_2SO_4	349/549	(0~140)ng·ml^{-1}	20	河水	97
	NO_2^--对氨基苯酚-间苯二酚-Cu	R	pH 2.5	436/581	(0~200)ng·ml^{-1}	1	天然水、污水	98
	NO_2^--$KBrO_3$-荧光素	Ca.	0.4mol·L^{-1} H_2SO_4[illegible]	500/510	(2~50)ng·ml^{-1}	—	水样	99
	NO_2^--2,3-二氨基萘	R	pH=8.0~12.0	358/405	(10~150)ng·ml^{-1}	0.4	环境水样	100
	NO_2^--4-羟基香豆素(β-CD)·$Na_2S_2O_3$	R	pH 9.5	383/457	(0.04~48)ng·ml^{-1}	40	饮用水、肉制品	101
	NO_2^--5-氨基荧光素	R	0.5mol·L^{-1} HCl, 1.1mol·L^{-1} NaOH	490/515	(0.046~460)ng·ml^{-1}	—		1,2
	NO_2^--[illegible]苯胺	R(Q)	4mol·L^{-1} HCl	326/387	(1~570)ng·ml^{-1}	—		1,2
	NO_2^--p-氨基苯胺-2,6-二氨基吡啶-[illegible]硫酸铜	R(E)	C_6H_6, pH 5	390/430	(2~30)ng·ml^{-1}	2		1,2
	NO_2^--2,3-二氨基萘	R(E)	1,1,2,2-四氯乙烷	364/412	(0~850)ng·ml^{-1}	—		2
	NO_2^--间苯二酚	R	$HClO_4$	346/382	(10~120)ng·ml^{-1}	—		1,2
NO_3^-	NO_3^--2,3-二氨基萘-硫酸肼	R	pH 7, pH 12	364/410	(0~2)μg·ml^{-1}	0.4	天然水	103
	NO_3^--Zn-$KBrO_3$-罗丹明6G	R, Ca.	pH 11.9	348/548	(0.25~24.6)ng·ml^{-1}	0.25	饮用水、饮料	102
	NO_3^--2,3-二氨基萘-硫酸肼	R		364/412	(0.01~1.11)μg·ml^{-1}			1,2
	NO_3^--2,2'-二羟基-4,4'-二甲氧基二苯酮	R	85%H_2SO_4	360/465	(5~10^3)μg·ml^{-1}	5	天然水、腐殖物	1,2
	NO_3^--荧光素	R(Q)	90%H_2SO_4	435/485	(10~120)ng·ml^{-1}	10		1,2
	NO_3^--间苯二酚	R		346/382	(1.2~16)ng·ml^{-1}			1,2
O_2	O_2-9,10-二羟基吖啶	R	—	—	—	200		1
	O_2-肾上腺素	R				10^3	水	1
	O_2-无色荧光素	R				10^3		1
O_3	O_3-9,10-二羟基吖啶	R	—	—	—	10		1
	O_3-2-二苯乙烯-1,3-[illegible]	R	—	468/536	(0~1)μg·ml^{-1}	20		1,3
Os	Os-4,6-双(甲硫基)-5-氨基嘧啶	C(Q)	—	—	(0.5~2.5)μg·ml^{-1}	—		1
P	磷钼酸盐-罗丹明6G	Q	0.1mol·L^{-1} HCl	350/560	(0~10)ng·ml^{-1}	—	地表水	6
	磷钼酸盐-罗丹明6G	Q	0.4~0.5mol·L^{-1} HCl	350/550.5	(0~35)ng·ml^{-1}	0.22	天然水	4
	磷钼酸盐-罗丹明6G	Q	—	350/555	(0~100)ng·ml^{-1}	1.9	水、合金、钢	4
	磷钼杂多酸-罗丹明6G	Q	0.075mol·L^{-1} H_2SO_4	350/565	(0~80)ng·ml^{-1}	0.343	铜合金、钢样、锡等	5

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
P	PO_4^{3-}-Al-桑色素	S(Q)	pH4.6	365/510	(0.05~1)μg·ml^{-1}	—		1,2
	PO_4^{3-}-Mg-3-羟基-4′,6′-二甲氧基黄酮	S(Q)	24%乙醇,pH5	425/508	(0.1~1.2)μg·ml^{-1}			1,2
	磷钼酸盐-罂丁	C	0.05mol·L^{-1} H_2SO_4	352/443	(0.02~0.6)μg·ml^{-1}			1,2
	磷钼酸盐-罗丹明B	C(E)	$CHCl_3$-丁醇,1mol·L^{-1}HCl	350/575	(30~300)ng·ml^{-1}			2
	磷钼酸盐-硫胺素	R	pH6	375/440	(5~150)ng·ml^{-1}	—	高纯砷,肾髓液体	1,2,3
	PO_4^{3-}-ATP-ADP-萤光	Enz			(3~50)ng·ml^{-1}			1
Pb	Pb-KI-罗丹明B-聚乙烯醇	Q	0.08mol·L^{-1} H_3PO_4	565/620	(0~100)ng·ml^{-1}	10	工业废水	5
	Pb-KI-丁基罗丹明B-聚乙烯醇	Q	2mol·L^{-1} H_3PO_4 1ml	502/635	(0~160)ng·ml^{-1}	10	空气	5
	Pb-钙黄绿素	C	—	485/520	(0~400)ng·ml^{-1}	10	天然水	1
	Pb-曙红	C(Q)	—	—	—	100		1
	Pb-对香草醛-H_2O_2-过氧化物酶	Enz	—	—	(10~1.85×10^4)pg·ml^{-1}	—		1
	Pb-荧光黄酸盐	C(Q)	—		(5~80)μg·ml^{-1}			1
	Pb-1,10-邻菲罗啉-曙红	C(E)	—	—	(0.1~1)μg·ml^{-1}	—		1
Pd	Pd-phen-乙基曙红	Q	pH5.0	524/540	(0~960)ng·ml^{-1}	40	废水	6
	Pd-水杨基荧光酮-CTMAB	Q	pH=6.0~7.5	282/536	(8~400)ng·ml^{-1}	3	Pd-Al_2O_3催化剂	6
	Pd-α,β,γ,δ-四苯基卟啉	Q	pH4.0	365/653	(20~800)ng·ml^{-1}	10	催化剂	6
	Pd-CTMAB-柠檬黄	C	pH12.8	504/552	(4~320)ng·ml^{-1}	2.3	贵金属矿样	4
	Pd-柠檬酸	C	pH=2.6~4.0	528/556	(0~480)ng·ml^{-1}	1	贵金属矿样	4
	Pd-苯基-2-吡啶酮-2-喹啉腙-BrO_3^-	R,C	—	290/362	(50~500)ng·ml^{-1}	45		1,3
	Pd-1,10-邻菲罗啉-曙红	C(E)			(20~140)ng·ml^{-1}			1
Po		F	—	215/275	(0~6)μg·ml^{-1}	—		4
Pr	Pr-噻吩甲酰三氟丙酮	C				10		1
Pt	Pt-2,2′-吡啶酮腙	Car	—	—	(0.2~6.0)μg·ml^{-1}			1
Re	Re-三溴偶氮胂	C	0.6mol·L^{-1}HCl	255/365	—	—		5
	Re-马尿酸偶氮氯膦	C	4%~6%HCl	251/365	—			5
	Re-吖啶橙	C(E)	—	—	(5~1×10^3)ng·ml^{-1}			1
	Re-罗丹明3B	C(E)	—	—	(15~630)ng·ml^{-1}	—		1
	Re-罗丹明6G	C(E)	苯或乙酸丁酯萃取	(530~555)/(550~580)	(20~200)ng·ml^{-1}	20	Cu-Mo矿石尾矿	1,3
	Re-罗丹明6Ж	C(E)	—	—	(0.15~6)μg·ml^{-1}	—		1
	Re-罗丹明B	C(E)	—	—	(3~800)ng·ml^{-1}	—		1
	Re-藏红T	C(E)	—	—	(3~100)ng·ml^{-1}	—		1
Ru	Ru-phen-十二烷基磺酸钠	C	—	437/617	(0.4~8×10^2)ng·ml^{-1}	0.4	岩矿	1
	Ru-H_2O_2-邻苯基荧光酮	Cat		400/510	(0~20)ng·ml^{-1}	0.05	合成样	4
	Ru-H_2O_2-水杨基荧光酮	Cat	pH9.6	400/560		10		6

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	检出限/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Ru	$Ru(SCN)_6R_3$-罗丹明6G	Q	pH3	525/551	(0~14)ng·ml^{-1}	-	合成样	6
	Ru-5-甲基邻菲罗啉	C	pH=1~2.5	紫外光/578	(0.3~2)μg·ml^{-1}	--		1,3
	Ru-邻菲罗啉	C			(5~300)ng·ml^{-1}			1
S^{2-}	S-8-羟基喹啉-5-磺酸镓-Al	S	pH4.5	362/498	—	0.6	水	6
	S-荧光素汞	Q	0.1mol·L^{-1} NaOH	490/510	—	6.4×10^{4}	大气,水,工业废水	6
	S-Hg-2-(o-羟基苯基)苯并噁唑	S	0.01mol·L^{-1} NaOH	365/439	(1~100)ng·ml^{-1}	-		2
	S-二乙酸汞荧光素	S(Q)	0.1mol·L^{-1} NaOH	469/519	(1~20)ng·ml^{-1}	-		2
	S-Hg-2,2'-吡啶基苯并咪唑	S	pH=6.2~7.0	311/361	(3.3~300)ng·ml^{-1}			2
	S-高香草酸-H_2O_2-过氧化物酶	Enz	pH8.5	405~460/	(0.3~3.2)μg·ml^{-1}	-		2
	S-Pd-8-羟基喹啉-5-磺酸	S	pH9.2	-	(0.2~5)μg·ml^{-1}	200		1,2
	S-四乙酸汞荧光素	S(Q)	NaOH	365/	—	10^{-2}		1,2
	S-3,4,5,6-四氯汞荧光素	S(Q)	pH=6.4~7.0	/550	(0~4)μg·ml^{-1}	-		2
	S-硫胺素-MnO_4^-	R(Q)	pH7.7	375/440	(1~20)ng·ml^{-1}	-		1,2
SO_3^{2-}	SO_2-9-N-Acridinylmaleimide	R	pH9.6	351/420	—	0.3	大气	4
	SO_3^{2-}-5-氨基荧光素-甲醛	R(Q)	HCl	405/515	(0.025~6.2)μg·ml^{-1}	20		1,2,3
	SO_3^{2-}-高香草酸-H_2O_2-过氧化物酶	Enz	—	—	(5~37×10^{3})μg·ml^{-1}	-		4
SO_4^{2-}	SO_4^{2-}-Th-黄酮醇	S(Q)	pH2.6(30%乙醇)	390/470	(0.2~0.6)μg·ml^{-1}	—		1,2
	SO_4^{2-}-Th-桑色素	S(Q)	pH2.3	365/500	(0.2~0.9)μg·ml^{-1}	—		1,2
	SO_4^{2-}-Th-[illegible]	C		---	(0.08~1.7)μg·ml^{-1}	-		1
	SO_4^{2-}-水杨基荧光酮-Th	S	pH=1~5	—	(50~400)ng·ml^{-1}	—		1,2
	SO_4^{2-}-Zr-钙黄绿素盐	C	pH1.6	350/410	(2~12×10^{3})μg·ml^{-1}	—		1,2
$S_2O_3^{2-}$	$S_2O_3^{2-}$-四乙酸汞荧光素	S(Q)	pH=5~6	515/	(3.3~33)ng·ml^{-1}			2
$S_2O_8^{2-}$	$S_2O_8^{2-}$-无色荧光素	R		440/470	(5~15)μg·ml^{-1}		面粉,生面团	2,3
Sb	$SbCl_6^-$-罗丹明B	Q	2mol·L^{-1}HCl	450/510	(10~250)ng·ml^{-1}	10	钢合金,电解精铜	6
	Sb-4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	Q	0.1mol·L^{-1}酸	紫外光/555	·	10		6
	$SbCl_6^-$-罗丹明6G-结晶紫	C(E)	6.5mol·L^{-1}H_2SO_4	539/555	(1.7~333)ng·ml^{-1}	1.7	铜合金,钢料	4
	$SbCl_6^-$-吖啶橙	C(E)			(5~800)ng·ml^{-1}			1
	Sb-3,7-二羟基黄酮	C	1mol·L^{-1}H_2SO_4	397/458	(0.1~2)μg	...		1,3
	Sb-桑色素	C(E)	—	...	(10~400)ng·ml^{-1}			1
	$SbCl_6^-$-罗丹明B-结晶紫	C(E)	—	—	(8~40)μg·ml^{-1}	-		1
	$SbCl_6^-$-罗丹明6G	C(E)			(0.1~2)μg·ml^{-1}	—		1
	$SbCl_6^-$-藏红T	C(E)		...	(0.015~1)μg·ml^{-1}	—		1
	$SbCl_6^-$-2,4',7-三羟基黄酮	C		422/475	(40~200)ng·ml^{-1}	1.6	土壤,岩石,生物体	1,3
Se	Se-桑色素	C	pH4.2	424/520	(0~520)ng·ml^{-1}	40	合成样	6
	Se-桑色素	C	..	420/500	(0~800)ng·ml^{-1}	20	岩矿	4

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/($ng\cdot ml^{-1}$)	应用	文献
Sc	Sc-桑色素-十二烷基硫酸钠	C	pH3.0	424/503	(1.4~230)$ng\cdot ml^{-1}$	1.4	岩矿标样	5
	Sc-3,5-二溴水杨醛缩烟酰腙	C	pH=4.5~5.5	335.4/510	(0~2)$\mu g\cdot ml^{-1}$	43	混合稀土氧化物	104
	Sc-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH5.8	398/505	(0~18)$\mu g\cdot ml^{-1}$	2.2	合成样	105
	Sc-5,7-二溴-8-羟基喹啉	C	—	—	(0.1~0.4)$\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-2,4-二羟基苯甲醛乙酰腙	C		406/	(15~150)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Sc-2,4-二羟基苯甲醛缩氨基脲	C	pH5.0	365/435	(0.8~400)$ng\cdot ml^{-1}$		[illegible]	1,2
	Sc-2-乙基-3-甲基-6-羟基色酮	C(E)	—	—	(16~400)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-2-乙基-5-羟基-4-甲氧基异黄酮	C(E)	—		(0~0.24)$\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Sc-2-羟基苯甲醛缩氨基脲	C	—	紫外光/455	(2~400)$ng\cdot ml^{-1}$			1,3
	Sc-5-羟基色酮	C(E)	—	—	(0~0.16)$\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-2-羟基-5-甲基苯甲醛缩氨基脲	C			(2~400)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-2-羟基-3-萘甲酸	C			(25~400)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-3,5-双[N,N'-二(羧甲基)-氨甲基]-4,4'-二羟基芪	C	稀HCl	365/490	(20~200)$ng\cdot ml^{-1}$	10		1,3
	Sc-4-甲氧基苯甲醛-2-羟基萘甲酰腙	C	pH=2.0~3.5	/505	(0.2~60)$ng\cdot ml^{-1}$	—	稀土氧化物	1,3
	Sc-媒染蓝31	C	pH6	/610	(40~480)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Sc-桑色素-安替比林	C(E)	—	430/510	(10~200)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Sc-5,7-二硝基-8-羟基喹啉-罗丹明B	C(E)		—	(0.02~4)$\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-槲皮-7-葡糖苷	C			(4~10)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-邻苯罗呋酮红	C(E)	—		(31~650)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sc-2-苯基辛可啶	C	—		(2~9×10³)$ng\cdot ml^{-1}$			1
	Sc-水杨酸-罗丹明B	C(E)	—	—	—	7		1
	Sc-过[illegible]红Y	C	—	—	(0.2~1.6)$\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Sc-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH5.5	390/505	(0~45)$ng\cdot ml^{-1}$	0.9	混合稀土	6
SCN	SCN^--氯胺T-吡啶巴比土酸	R	—	—	(9~140)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1
Se	Se-2,3-二氨基萘	C(E)	pH=1.5~2.0	380/520	(0~65)$ng\cdot ml^{-1}$	0.4	中药,[illegible],工业硫酸	4
	Se-2-(α-吡啶基)喹啉-2-硫代[illegible]	C	0.1mol·$L^{-1}$$H_2SO_4$	357/495	(0.02~10)$ng\cdot ml^{-1}$	0.02	头发,血清,自来水	106
	Se-2,3-二氨基萘-β-CD-十二烷基硫酸钠	C,R	pH<2,环己烷	379/520	(0~100)$ng\cdot ml^{-1}$	2	硒代蛋氨酸	107
			pH4,水	378/567	(2~50)$ng\cdot ml^{-1}$	1	药片	
	Se-2,3-二氨基萘	C(E)	pH=1.8~2.0	380/520	(0~35)$ng\cdot ml^{-1}$	[illegible]	毛发,粮食,土壤	143
	Se-2,3-二氨基萘-β-CD-1,2-二溴丙烷	R	pH2	365/550	(0~220)$ng\cdot ml^{-1}$	30	人发,茶叶	108
	Se-KBH_4-8-羟基喹啉铝-Al	R,S,C	pH5.2	352/497	(2~40)$ng\cdot ml^{-1}$	0.26	[illegible],水样	109
	Se-3,3'-二氨基联苯胺	C(E)	[illegible]	436/590	(0.01~1)$\mu g\cdot ml^{-1}$	—	尿,血,乳,生物体	1,3
	Se-2,3-二氨基萘	C(E)	—	366/590	(1~550)$ng\cdot ml^{-1}$	—	土壤,海水,植物	1,3
	Se-[illegible]	C(E)	—	—	(8~470)$ng\cdot ml^{-1}$	—		1
Si	硅钼杂多酸-罗丹明6G-PVA	Q	0.028mol·L^{-1} H_2SO_4	350/555	(0~20)$ng\cdot ml^{-1}$	0.21	铝合金,钢样	110
	Si-$(NH_4)_2MoO_4$-硫胺素	R	pH3.0	360/470	(0~1.2)$\mu g\cdot ml^{-1}$	2	化学试剂	4
	Si-钼酸铵-胭脂红酸	S	pH5.2	475/505		3		1,2
	Si-安息香-[illegible]	C	甲酰胺-[illegible]	386/	(80~400)$ng\cdot ml^{-1}$	—	纯金属,半导体	1,2,3

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Sm	Sm-TTA-phen	C	乙酸钠介质	紫外光/	—	0.03		6
	Sm-TTA-phen-吐温 20	C	pH5.5	350/648	—	2		6
	Sm-噻吩三氟丙酮-phen-Triton X-100	C	pH=6.0~6.5	368/565	—	15		6
	Sm-TTA-phen-吐温 80	C	pH5.5	360/652		5.6		5
	Sm-Ln^{3+}-TTA-DPC-Triton X-100	C	1.0mol·L^{-1} NH_4Ac溶液	368/645.6	—	·		5
	Sm-Lu-TTA-phen-Triton X-100	C	pH=5.6~7.0	370/565	$(1.0\times10^{-8}\sim6.0\times10^{-7})$mol·L^{-1}	0.11	合成样	6
	Sm-HPA-TOPO	C	pH3.0			90		5
	Sm-HPA-TOPO-Triton X-100	C	pH3.0	350/600	—	8		6
	Sm-Gd-DBM-NH_3-丙酮	C	pH9.3	·	—	17		5
	Sm-TTA-phen	C	—	N_2激光	—	2.0×10^{-5}		6
	Sm-Eu-TTA-TOPO-Triton X-100	C		365/535	$(10^{-4}\sim10^{-7})$mol·L^{-1}	0.05	合成样	4
	Sm-Eu-TTA-phen-Triton X-100	C	—	370/565	$(2\times10^{-10}\sim1\times10^{-7})$mol·L^{-1}	0.045	合成样品	4
	Sm-Gd-二苯甲酰甲烷-氨-丙酮	C	—	400/565	$(1\times10^{-8}\sim5\times10^{-7})$mol·L^{-1}	8×10^{-9}mol·L^{-1}	合成样	4
	Sm-三氟乙酰丙酮-TOPO-Triton X-100	C	—	三氮激光光谱	$(5\times10^{-9}\sim1\times10^{-6})$mol·L^{-1}	—	合成样	4
	Sm-三氟乙酰丙酮-TOPO-表乳 100	C	pH7.0	激光拉曼/644	$(0.2\sim200)$ng·ml^{-1}	0.01	氧化钇,合成样	4
	Sm-苯甲酰丙酮-phen	C		370/613		0.1nmol·L^{-1}	合成样	4
	Sm-HC	F	HF/HC	402/560	$(0.08\sim8.0)$mg·ml^{-1}		稀土氧化物	5
	Sm-苯甲酰丙酮-邻菲罗啉	C	pH=7.0~8.0	400/570	$(5.0\times10^{-8}\sim1.0\times10^{-5})$mol·L^{-1}	3.0×10^{-8}mol·L^{-1}	合成混合稀土	5
	Sm,Eu-四环素类抗生素	C	pH=12~1.0mol·L^{-1}NaOH	380/644	$(0\sim100)$ng·ml^{-1}	38.2	混合稀土氧化物	51
	Sm,Eu-DBM-溴化十六烷基吡啶	C	pH=9.2~10.0	355/644	$(0.1\sim200)$ng·ml^{-1}	0.1	氧化钇,合成样	35
	Sm,Eu,Tb-DBM-NH_3	C	pH9.25	400/585	$(10^{-7}\sim10^{-5})$mol·L^{-1}	7×10^{-8}mol·L^{-1}		53
	Sm,Gd-TTA-phen-Triton X-100	C	pH6.5	368/565	$(1.0\times10^{-8}\sim6.0\times10^{-6})$mol·L^{-1}	7.5×10^{-9}mol·L^{-1}	合成样	111
	Sm-DBM-TOPO-表乳-100	C	30%NH_4Ac	355/644	$(0.08\sim200)$ng·ml^{-1}	0.01	氧化钇,合成样	112
	Sm,Eu,Gd-DBM-CTMAB-Triton X-100	C	pH9.7	390/585	$(1.0\times10^{-8}\sim5.0\times10^{-6})$mol·L^{-1}	10^{-9}mol·L^{-1}	稀土氧化物	66
	Sm,Tb,Dy-5-磺基水杨酸-EDTA-CTMAB	C	pH12.5	297/647	$(0\sim0.5)$μg·ml^{-1}	60	稀土氧化物	52
	Sm,Eu,Tb,Dy-吡啶-2,6-二羧酸	C	pH7.0	272/645	$(0\sim1.5)$μg·ml^{-1}	3.5	地质和环境样	53
	Sm,Eu,Y-TTA-phen-Triton X-100	C	pH7.0	375/585	$(4\times10^{-10}\sim1.0\times10^{-7})$mol·L^{-1}	0.045	合成样	113
	Sm,Eu,Tb-TTA-TOPO-Triton X-100	C	pH7.0	350/565	$(1.0\times10^{-9}\sim8.0\times10^{-7})$mol·L^{-1}	0.03	合成样	114
	Sm-1,1,1,5,5,5-六氟-2,4-戊二酮	C			$(5\sim100)$ng·ml^{-1}			1
	Sm-六氟乙酰丙酮-TOPO	C(E)	—	—	$(7\sim1.5\times10^{3})$ng·ml^{-1}	—		1
	Sm-2-萘甲酰基三氟丙酮-TOPO	C(E)	pH=5.5~6.5	紫外光/365	$(0.1\sim5)$μg·ml^{-1}	100		1,3
	Sm-噻吩甲酰三氟丙酮-对苯二甲酸二苯胍	C(E)	pH5.1	371/611	$(0.05\sim1)$μg·ml^{-1}			1,3
	Sm-噻吩甲酰三氟丙酮-phen	C(E)	-	紫外光/562	$(0.05\sim1)$μg·ml^{-1}		光学玻璃	1,3

检测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/($\mu g\cdot ml^{-1}$)	应用	文献
Sm	Sm-噻吩甲酰三氟丙酮-TOPO	C(E)	—	—	$(2\times10^{-3}\sim1.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sm-1,1,1-三氟-5,5-二甲基-2,4-己二酮-TOPO	C	—		$(0.03\sim1.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
Sn	Sn-邻氯苯基荧光酮-CTMAB	C	pH4.2	530/550		5		6
	Sn-桑色素-CTMAB	C	$0.02mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	455.6/510		0.5		6
	Sn-邻氯苯基荧光酮-CTMAB	Q	—	530/550	$(20\sim180)ng\cdot ml^{-1}$	—	铜合金、岩矿	4
	Sn-桑色素-十二烷基硫酸钠	C	·	455.5/510	$(0\sim60)ng\cdot ml^{-1}$	—	罐头食品	4
	Sn-桑色素-Triton X-100-β-CD	C	$0.1mol\cdot L^{-1}$ HCl	400/510	$(10\sim130)ng\cdot ml^{-1}$	1.7	地质样品、锌合金	5
	Sn-四氯化锡-桑色素-十二烷基硫酸钠	K-C	$(0.035\sim0.055)mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	425/500	$(0\sim60)ng\cdot ml^{-1}$	—	钢、地质样品	115
	Sn-桑色素-十二烷基硫酸钠	C	$0.02mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	400/530	$(40\sim480)ng\cdot ml^{-1}$	3.7h	罐头食品	116
	Sn-桑色素-十二烷基硫酸钠	C	$0.03mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	455/500	$(0\sim1.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	.	钢、铸铁	117
	Sn-3,7-二羟基黄酮	C	$4mol\cdot L^{-1}$ H_3PO_4	405/430	$(0.8\sim20)ng\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Sn-黄酮醇	C	$0.08mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	405/470	$(0.1\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Sn-3-羟基色酮	C	—	—	$(16\sim320)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Sn-邻羟基苯甲醛肟	C	pH=2.0~2.6	/520	$(0\sim55)\mu g\cdot ml^{-1}$			1,3
	Sn-8-羟基喹啉	C(E)	氯仿萃	··	$(0.2\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$			1,3
	Sn-6-羟基喹啉-α-偶酚	C	pH=4~5.2	360 /510~515	$(5\sim250)ng\cdot ml^{-1}$			1,3
	Sn-桑色素	C(E)		—	$(2\sim100)ng\cdot ml^{-1}$	—	矿物	1,3
	Sn-桑色素-安替比林	C(E)	$(0.06\sim0.075)mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	435/500		300	铝合金	1,3
	Sn-5-磺基-2-羟基-8-萘胺	R	微酸性	365/	$(0.1\sim2)\mu g\cdot ml^{-1}$		铜合金	1,3
	Sn-罗丹明B-Br^-	C(E)	苯萃取 $2mol\cdot L^{-1}$ HBr	560/580	$(0.1\sim3)\mu g\cdot ml^{-1}$			1,3
	Sn-(邻亚水杨基氨基)-2-羟基苯磺酸	C	—	·	$(3.8\sim400)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Sn-3,4',7-三羟基黄酮	C(E)	—	427/472	$(7\times10^{-3}\sim6)\mu g\cdot ml^{-1}$	0.28	土壤、岩石、生物样	1,3
Sr	Sr-8-羟基喹啉	C		380/508		0.2μg		1,3
Ta	Ta-丁基罗丹明B	C		450/510		10	矿石	4
	Ta-水杨基荧光酮-CTMAB	Q		紫外/533	$(5\sim40)ng\cdot ml^{-1}$	4	矿样	4
	TaF_6^--孔雀石绿(苯萃取)用丁基罗丹明B溶剂交换	C,S	$6mol\cdot L^{-1}$ H_2SO_4	565/577	$(11\sim100)ng\cdot ml^{-1}$	—	含 Nb_2O_5 样	5
	Ta-丁基罗丹明B-F^-(苯萃)	C(E)			$(20\sim400)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Ta-桑色素-H_2O_2	C(E)			$(3.6\sim70)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Ta-罗丹明6G-F^-	C(E)		(510~537)/560	$(5.5\sim50)ng\cdot ml^{-1}$	—	纯 SiO_2、$SiHCl_3$	1,3

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	检测限/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Tb	Tb-$HClO_4$	F	6%$HClO_4$介质	221/544	$(1\sim5\times10^{3})$ng·ml^{-1}	—		6
	Tb-铁试剂-CTMAB	C	pH=10.5~10.8	319/544	—	0.05		6
	Tb-亚氨基二乙酸-铁铁试剂-CTMAB	C	pH=11.2~12.5	324/545	(0.54~320)ng·ml^{-1}	5.2×10^{-1}	氧化钆	6
	Tb-六氟乙酰丙酮-TOPO-Triton X-100	C		320/545		0.36		6
	Tb-In-TTA-DPC-Triton X-100	C	1mol·L^{-1} NH_4Ac0.5ml	368/545.6	·	—		6
	Tb-HFA-TOPO	C	pH3			1.28		6
	Tb-EDTA-钛铁试剂-CTMAB	C	pH2	316/544	—	0.02		5
	Tb-Triton X-100-六氟乙酰丙酮-TOPO	C	—	330/545	$(1\times10^{-9}\sim5\times10^{-7})$mol·L^{-1}	10^{-10}mol·L^{-1}	合成样	4
	Tb-EDTA-水杨酸-CTMAB	C	pH=11.7~12.5	324/546	(0~200)ng·ml^{-1}		合成样	4
	Tb-三氟乙酰丙酮-TOPO-Triton X-100	C		三维荧光光谱	$(5\times10^{-10}\sim5\times10^{-7})$mol·L^{-1}	·	合成样	4
	Tb-1,4-双(1'-苯基-3'-甲基-5'-氧化吡唑-4'-基)丁二酮(1,4)-CTMAB	C	pH 4.2~5.4	296/545	$(2.0\times10^{-8}\sim1.0\times10^{-5})$mol·L^{-1}	6.0×10^{-9}mol·L^{-1}	合成样	5
	Tb,Gd-缩二甘醇酸	C	pH5.5	225/545	(2~1000)ng·ml^{-1}	3	稀土氧化物	78
	Tb,Gd-乙二醇二乙醚二胺四乙酸	C	pH=4.0~8.0	216/545	(20~2000)ng·ml^{-1}	2.5	稀土分离富集物	77
	Tb,Dy-亚氨基乙二酸-钛铁试剂-CTMAB	C	pH12	326/546	$(2\times10^{-10}\sim8\times10^{-5})$mol·L^{-1}	5×10^{-10}mol·L^{-1}	合成样	51
	Tb,Eu-吡啶-2,3-二羧酸	C	pH6.0	280/551	(1~600)ng·ml^{-1}	2.0	混合稀土氧化物	67
	Tb,Eu-吡啶-2,6-二羧酸	C	0.16mol·L^{-1}NaOH	272/545	(0~16)ng	1.7	合成样	69
	Tb,Dy,Sm-5-磺基水杨酸-EDTA-CTMAB	C	pH12.5	237/546	(0~700)ng·ml^{-1}	1.0	稀土氧化物	52
	Tb,Dy,Sm,Eu-吡啶-2,6-二羧酸	C	pH7.0	272/545	(0~1.08)μg·ml^{-1}	0.09	地质和环境试样	53
	Tb-EDTA-钛铁试剂-CTMAB	C	pH13	319/544	(0.02~800)ng·ml^{-1}	—	氧化钆	118
	Tb-乙酰丙酮	C	pH=8~6.5	301/540	(2~40)ng·ml^{-1}	—	磷钇矿	119
	Tb-动物胶	C	pH7.0	291/547	(0.1~10)μg·ml^{-1}	0.1	稀土氧化物	120
	Tb-吡啶-2,6-二羧酸	C	pH6.5	285/542	(4~40)ng·ml^{-1} (20~240)ng·ml^{-1}		稀土氧化物	121
	Tb-乙醇-水杨酸	C	—	337.1/543	(10~50)ng·ml^{-1}	0.13	混合稀土	122
	Tb-水杨酸苯酯-Triton X-100	C	pH5.5	356/546	(2~600)ng·ml^{-1}	5.4	稀土氧化物	123
	Tb-水杨酸苯酯-Triton X-100-Gd	C	pH5.5	356/546	(2~600)ng·ml^{-1}	2.2	稀土氧化物	123
	Tb-Gd-均苯四甲酸	C	pH=5.0~6.0	295/545	$(1.0\times10^{-8}\sim6.0\times10^{-5})$mol·L^{-1}	4×10^{-9}mol·L^{-1}	稀土样品	124
	Tb-1,6-双(1'-苯基-3'-甲基-5'-吡唑酮-4'-基)己二酮-CTMAB	C	pH6.0	290/545	$(1.0\times10^{-10}\sim6.0\times10^{-6})$mol·L^{-1}	3.0×10^{-11}mol·L^{-1}	合成样	125
	Tb-乙酰丙酮	C			(4~2000)ng·ml^{-1}	·		1
	Tb-安替比林-四苯硼酸钠	C	—		(0.05~5)μg·ml^{-1}	—		1
	Tb-安替比林-水杨酸	C(E)	—		(0.01~5)μg·ml^{-1}	—		1
	Tb-二安替比林甲烷-水杨酸	C	—	—	$(1.8\times10^{-3}\sim1.6\times10^{2})$μg·ml^{-1}	10^{-7}%		1
	Tb-二甲基甲酰胺-乙酸	C	·	375/545	$(1.73\times10^{-4}\sim1.73\times10^{2})$μg·ml^{-1}	—		1,3

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(μg·ml⁻¹)	应用	文献
Tb	Tb-吡啶二羧酸	C	—	—	$(5.7\times10^{-5}\sim13)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Tb-EDTA-乙酰丙酮	C	pH=10~11.5	紫外光/546	$(1.6\times10^{-4}\sim1.6)\mu g\cdot ml^{-1}$	2×10^{-4}%		1,3
	Tb-EDTA-2,3-二羟萘酸	C	—	—	$(1\sim400)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Tb-EDTA-水杨酸盐	C			$(0.7\sim500)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Tb-EDTA-磺基水杨酸	C		330/545	$(6.4\times10^{-5}\sim3.2)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Tb-EDTA-钛铁试剂	C	pH 12~13	紫外光/546	$(0.09\sim320)ng\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Tb-α,α′-亚乙基二氨基二(邻羟基苯乙酸)	C			$(1.5\sim15)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Tb-六氟乙酰丙酮-TOPO	C(E)			$(5.6\times10^{-4}\sim1.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Tb-六氟-2,4-戊二酮	C			$(2\sim25)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
	Tb-8-羟基苯基亚氨基二乙酸	C	—	—	$(0.02\sim17.3)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Tb-3-甲基-1-(4-磺基苯基)-5-吡唑啉酮	C	pH7.5	紫外光/374	$(15\sim150)ng\cdot ml^{-1}$	—	光学玻璃	1,3
	Tb-phen-水杨酸盐	C			$(5\times10^{-4}\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Tb-4,4′-亚甲基-二[3-甲基-1-(2-吡啶基)吡唑啉-5]	C	pH=7~8	紫外光/549.5	$(10^{-4}\sim10^{-2})$% $(10\sim100)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Tb-水杨酸苯酯	C	微碱性	紫外光/343	—	60		1,3
	Tb-吡啶-2,6-二羧酸	C	—		$(0.6\sim8)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Tb-偏苯三酸酐	C	—	—	$(18\sim730)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Tb-钛铁试剂	C		316/546	$(4\times10^{-4}\sim150)ng\cdot ml^{-1}$	—		1,3
	Tb-钛铁试剂-亚氨二乙酸	C	—	紫外光/540,546	$(4\times10^{-4}\sim40)\mu g\cdot ml^{-1}$			1,3
	Tb-1,1,1-三氟-5,5-甲基己二酮-2,4-TOPO	C			$(1.5\sim150)ng\cdot ml^{-1}$	—		1
Te	Te-碘化物配体	S	$6mol\cdot L^{-1}H_2SO_4$	556/570	—	1.7		5
	Te-丁基罗丹明B-Br	C(E)	—	—	$(4\sim230)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Te-罗丹明B-Cl	C(E)	—	—	$(40\sim70)ng\cdot ml^{-1}$			1
	Te-罗丹明3GO-Cl	C(E)	—	—	$(0.75\sim10)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		1
	Te-罗丹明4G-Cl	C(E)	—	—	$(0.17\sim13.3)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Te-罗丹明6J-Br	C(E)	—	—	$(0.1\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Te-2,3,4-三羟苯二苯酮	C	—	—	$(9\sim65)ng\cdot ml^{-1}$			1
Th	Th-桑色素-三烷基氧化膦-CTMAB	C	—	428.6/508.6	—	0.12		6
	Th-桑色素-TOPO-十二烷基磺酸钠	C	$(0.1\sim2.2)mol\cdot L^{-1}H_2SO_4$	430/519	$(0\sim90)ng\cdot L^{-1}$	2.5×10^{-3}	环境水样	5
	Th-5,7-二溴-8-羟基喹啉-罗丹明B	C(Q)	—	—	$(0.04\sim1.2)\mu g\cdot ml^{-1}$			1
	Th-5,7-二硝基-8-羟基喹啉-罗丹明B	C(E)	—	—	$(2\sim1.5)\times10^{2}\mu g\cdot ml^{-1}$			
	Th-黄酮醇	C	碳酸钠	400/460	$(0.01\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$		独居石	1,3
	Th-桑色素	C			$(20\sim200)ng\cdot ml^{-1}$	20	空气颗粒物	1,3
	Th-3,4′,7-三羟基黄酮	C	—	/520	$(1.2\sim400)ng\cdot ml^{-1}$	0.5		1,3

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
Ti	Ti-二溴羟基荧光酮	C	pH1.5	530/562		10		6
	Ti-Triton N-101-phen-溴邻苯三酚红	C	pH2.2	450/475	(0~400)ng·ml⁻¹	2	钢、土壤	6
	Ti-4,5-二溴苯基荧光酮-CTMAB	Q	0.04mol·L⁻¹ H_2SO_4	365/552	(0~800)ng·ml⁻¹		不锈钢、铝合金	6
	Ti-CTMAB-5-溴-水杨基荧光酮	C	1mol·L⁻¹ H_2SO_4 3.5ml	515/533	—	16		6
	Ti-CTMAB-5-溴-水杨基荧光酮	C	1mol·L⁻¹ H_2SO_4 2.5ml	515/530		4		5
	Ti-5-溴-水杨基荧光酮-CTMAB	C	—	515/533	(0~16)ng·ml⁻¹	4	铝合金、钢、铁矿	4
	Ti-丁二酮单肟水杨醛腙	C	—	420/530	(10~80)ng·ml⁻¹	—		4
	Ti-邻氯苯基荧光酮-CTMAB	Q	—	365/550	(2~100)ng·ml⁻¹	—	钢、铝合金	4
	Ti-水杨基荧光酮	Q	—	500/510	(4~80)ng·ml⁻¹	4	钢	4
	Ti-水杨基荧光酮-吐温80	Q	pH=1.0~2.0	500/520	(4~80)ng·ml⁻¹	4	钢、铝合金	5
	Ti-苯基荧光酮-CTMAB	Q	pH=2.2~3.5	530/550	(8~48)ng·ml⁻¹	—	铝合金	126
	Ti-H_2O_2-CTMAB-2,4-二甲氧基苯基荧光酮	Q	pH=4.9~6.0	460/516	(0~48)ng·ml⁻¹	1.8	地质样品	127
	Ti-二苯亚甲基-2-氧基-3-羟基-4,5-二苯呋喃	C			(50~400)ng·ml⁻¹			1
	Ti-苯甲酰基苯亚甲基-2-氧基-3-羟基-4,5-二苯呋喃	C	—	—	(50~400)ng·ml⁻¹	—		1
	Ti-3-乙基-5-羟基-2-甲基苯并吡喃酮-4	C(E)	—	—	(10~100)ng·ml⁻¹	—		1
	Ti-8-羟基喹啉-H_2O_2-四苯硼酸钠	C(E)			(0.22~22)μg·ml⁻¹			1
	Ti-皮考啉醛缩胺脲	Ca	—	365/445	(60~300)ng·ml⁻¹			1,3
Tl	$TlCl_4^-$-亚甲基蓝-1,2-二氯乙烷	C		668/682	(0~400)ng·ml⁻¹		矿样	4
	$TlCl_4^-$-吖啶橙	C(E)	—	—	(3~500)ng·ml⁻¹			1
	$TlCl_4^-$-吖啶黄素	C(E)		—	(2.5~500)ng·ml⁻¹			1
	$TlCl_4^-$-丁基罗丹明B-结晶紫	C(E)	2mol·L⁻¹ H_3PO_4	—	(3~270)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Tl-1,4-二氯苯-2,3-二羟基萘醌	R			(2.1~33)μg·ml⁻¹	—		1
	$TlCl_4^-$-2-(4-甲氧基苯基)-6,7-二苯基-4H-1,3,4-三嗪二嗪并[3,2-a]苯并咪唑	C(E)			(4~80)μg·ml⁻¹			1
	Tl-罗丹明B-Cl⁻-Br⁻	C(E)		365/580	(0.2~200)ng·ml⁻¹	0.2	硅酸盐	1,3
	$TlBr_4^-$-罗丹明6G	C(E)	—	—	(50~1000)ng·ml⁻¹	—		1
	$TlBr_4^-$-罗丹明6J	C(E)	—	—	(5~250)ng·ml⁻¹	—		1
	$TlCl_4^-$-2,4,6-三苯基吡喃鎓氯化物	C(E)	—	—	(15~400)ng·ml⁻¹	—		1
Tm	Tm-吡啶-2,6-二羧酸	C	pH8.5	272/476	(0~2)μg·ml⁻¹	40	稀土氧化物	128
	Tm-EDTA-H_2O_2	C	pH=7~10	362/455	(0.1~10)μg·ml⁻¹	—		129
U	U-Na_2CO_3-NaF 固体荧光法	F	1mol·L⁻¹ HNO_3	337/504	—	5×10⁻⁴μg/片	食品、尿、水、空气、土壤	6
	U-NaF 固体荧光法	F		337/542	(0~10)μg·ml⁻¹	50	动植物	4
	UO_2^{2+} 荧光增强法	F	—	激光/激光/510			自来水、土壤、植物	4

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	检出限/(ng·ml^{-1})	应用	文献
U	U-[illegible]	C(Q)	pH4.0		(3.8~23.2)μg·ml^{-1}	800		1,3
	U-N-β-羟基乙基[illegible]	C(Q)			(6×10^{-4}~1)μg·ml^{-1}			1
	U-N-β-羟基丙基[illegible]	C(Q)			(6×10^{-4}~1)μg·ml^{-1}			[illegible]
	U-桑色素	C(Q)	丙酮,中性	—	(0.06~1.3)μg·ml^{-1}	50		1,3
	U-罗丹明 6G-二苯乙醇酸	C(E)			(0.2~10)μg·ml^{-1}	—		1
	U-罗丹明 B-苯甲酸	C(E)			(2×10^{-2}~4)μg·ml^{-1}			1
	U-噻吩甲酰三氟丙酮	C	液氮冷冻	激发光/527	(0.01~1)μg·ml^{-1}			1,3
V	V-2,6-二羧基苯基荧光酮	Q	—	465/510	(0~200)ng·ml^{-1}	—		4
	V-二溴苯基荧光酮-非离子表面活性剂	Q		465/510	(1~150)ng·ml^{-1}			4
	V-溴酸盐-还原型罗丹明 B	Cat	pH0.9	561/576.5	(5~100)ng·ml^{-1}	2	矿石	6
	V-邻氯苯基荧光酮-表面活性剂	Q	pH5.5	595/550	(0.8~1.7)ng·ml^{-1}	4×10^{-10}mol·L^{-1}	天然水	5
	V-硫胺素	R	0.8mmol·L^{-1} H_2SO_4	400/454	(2.5×10^{-8}~1.25×10^{-6})mol·L^{-1}	—	粮食	5
	V-$KBrO_3$-还原型罗丹明 B	Cat	0.2mol·L^{-1}HAc	545/578	(0~350)ng·ml^{-1}		合成样	130
	V-$KBrO_3$-还原型丁基罗丹明 B	Cat	0.4mol·L^{-1}HAc	548/578	(0~380)ng·ml^{-1}	—	合成样	130
	V-$KBrO_3$-吡罗红 Y	Cat	0.60mol·L^{-1} 柠檬酸	560/550	(0~30)ng·ml^{-1}	0.02	水样,人发	131
	V-KIO_3-中性红	Cat	0.034mol·L^{-1}HCl	531/445	(0~800)ng·ml^{-1}	0.7	水样,废钒钢	132
	V-1-氨基-4-羟基蒽醌	R	0.5mol·L^{-1}HCl	480/575	(80~360)ng·ml^{-1}	—		1,3
	V-2-氨基苯酚-ClO_3^-	Cat	…	—	(0.1~5)μg·ml^{-1}			1
	V-苯甲酸	R	磷酸性	300/410	(0.5~4000)ng·ml^{-1}		生物试样	1,3
	V-4,5-二氨基-1,8-二羟基蒽醌-2,7-磺酸钠	Cat	磷酸介质	524/582	(45~500)ng·ml^{-1}			1,3
	V-4,5-二氨基-1,8-二羟基蒽醌-2,7-二磺酸钠-Fe(Ⅱ)	Cat	—	—	(1~10)ng·ml^{-1}			[illegible]
	V-1,4-二氨基-5-硝基蒽醌	R			(0.1~0.8)μg·ml^{-1}			1
	V-Ga-荧光镓	C(Q)	—	—	(20~300)ng·ml^{-1}	—		1
	V-溴酸盐-硫化物-磺胺酸	Cat	pH5		(0.02~20)μg·ml^{-1}			1,3
	V-1,3,5-三苯基-Δ^2-吡唑啉	R	—	—	(30~350)ng·ml^{-1}	—		1
W	W-水杨基荧光酮-CTMAB	Q	pH=1.2~3.5	500/520	(4~100)ng·ml^{-1}	4	合金钢	4
	W-二溴羟基苯基荧光酮-CTMAB	Q	0.02~0.10mol·L^{-1} H_2SO_4	470,502/520	(0.2~10)μg·ml^{-1}	0.2	合金钢	5
	W-肉桂红 S	C	酸性中	/650	(0.5~4)μg·ml^{-1}			1,3
	W-桑酯红醇	C	pH4.5	515/585	(40~360)ng·ml^{-1}			1,3
	W-黄酮醇	C	pH1.2	365/462	(60~420)ng·ml^{-1}		钢	1,3
	W-荧光镓	C	—	—	(0.07~1.1)μg·ml^{-1}	—		1
	W-桑色素	C	pH=5.1~5.4	500/510	(3~48)μg·ml^{-1}	—		1,3
	W-罗丹明 B	C(Q)		/583	(1~23)μg·ml^{-1}	—		1,3

续表

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml^{-1})	应用	文献
Y	Y-8-羟基喹啉-CTMAB	C	—	398/535	(0~0.5)μg·ml^{-1}	4	模拟样品	6
	Y-双(8-羟基-2-喹啉基)丙基胺	C(F)				2		1
	Y-5,7-二溴-8-羟基喹啉	C(E)	pH=7.0~7.6	400/550		17	锆盐	1,3
	Y-2,4-二羟基苯甲醛缩氨基脲	C		—	(0.04~1.2)μg·ml^{-1}			1
	Y-8-羟基喹啉	C(E)	—	紫外光/530	(0.5~5)μg·ml^{-1}	20		1,3
Zn	Zn-meso-四(对羟苯基)卟啉-CP	C	pH=8.3~9.6	445/632	(0~52)ng·ml^{-1}	0.6	自来水,头发	6
	Zn-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH6.0	400/510	(0~10)ng·ml^{-1} (0~40)ng·ml^{-1}	2	合成样	6
	Zn-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH5	383/520	—	2		6
	Zn-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH4.3	373/545	(0~220)ng·ml^{-1}	10	合成样	6
	Zn-meso-四(4-吡啶)卟啉	C	pH2.0	442/655		1		6
	Zn-meso-四(N-甲基-3-吡啶基)卟啉	C	pH9.3	430/606	(0~40)ng·ml^{-1}	1	自来水,人发	4
	Zn-meso-四(4-三甲胺苯基)卟啉	C	pH=5.5~8.6	423/615	(0~30)ng·ml^{-1}	9	钢样品	5
	Zn-桑色素-Triton X-100	C	NaAc-HAc缓冲液	430/(490~510)	(0~4)μg·ml^{-1}	—	人发,合成样	12
	Zn-Cu-meso-四(4-甲基-3-磺酸基苯基)卟啉	Q	pH10.0	440/654	—	1.0	大麦水,废水	37
	Zn-四-(4-对氨苯基)卟啉	C	pH7	370/510	(0~80)ng·ml^{-1}	10	矿样,自来水	133
	Zn-四-(3-间氨苯基)卟啉	C	pH7	370/510	(0~80)ng·ml^{-1}	3.5	自来水,矿样	134
	Zn-8-羟基喹啉-5-磺酸-CTMAB	C	pH6.54	406/512	(0~40)ng·ml^{-1}	—	血液	135
	Zn-桑色素-羧甲基-β-CD	C	pH4.7	433/(450~600)	(0~70)μg·ml^{-1}	220	铜镍,水样	136
	Zn,Ca-水杨醛缩对氨基酸	C	pH4.7	分离,同步光谱	(0.52~1.5)μg·ml^{-1}		生物样品,食品酒饮用水,发水	137
	Zn-氯乙酰苯酚腙-2-吡啶	C	pH4.5	398/522	(12~250)ng·ml^{-1}	5.5	自来水	138
	Zn-1-苯并咪唑-2-基-2-喹啉腙	C		470/530	(0~11)ng·ml^{-1}			1,3
	Zn-苄基-2-吡啶酮-2-喹啉腙	C		—	(10~350)ng·ml^{-1}	—		1
	Zn-苄基-2-吡啶酮-2-吡啶腙	C	—		(15~65)ng·ml^{-1}	—		1
	Zn-8-羧基甲基-8-羟基喹啉	C	—		(65~650)ng·ml^{-1}	—		1
	Zn-二苯并噻唑甲烷	C		—	(0.25~50)μg·ml^{-1}			1
	Zn-2,4-二羟基苯甲醛缩氨基脲	C	—	—	(0.04~1.2)μg·ml^{-1}	—		1
	Zn-8-羟基喹啉	C	—	—	(0.4~12)μg·ml^{-1}	—		1
	Zn-8-羟基喹啉-苄酸	C(E)	—	—	(0~20)μg·ml^{-1}	—		1
	Zn-8-羟基喹啉-5-磺酸-甲基三辛基氯化铵	C(E)	pH6.4	400/522	(0.12~16.2)μg			1,3
	Zn-2-羟基苯甲醛缩氨基硫脲-H_2O_2-Mn(Ⅱ)	Cn	—	365/445	(50~400)ng·ml^{-1}	—	牛奶	1,3
	Zn-2-(1-甲基-2-吡啶基)-5(6)-苯基苯并咪唑	C			(10~30)ng·ml^{-1}			1

被测物质	体系	方法	测定条件	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$/nm	线性范围	灵敏度/(ng·ml⁻¹)	应用	文献
Zn	Zn-锌试剂	C	pH=4.7~5.0	紫外光/500	(3~18)μg	3μg	合成锌	11
	Zn-phen-曙红荧光素	C(E)	—	—	(10~200)ng·ml⁻¹	—		1
	Zn-phen-曙红	C(E)	—	—	(10~100)ng·ml⁻¹			1
	Zn-皮考啉醛-2-喹啉腙	C	—	—	(25~315)ng·ml⁻¹			1
	Zn-吡哆醛缩氨脲-氯化乙二氨合吡啶	C	—		(50~550)ng·ml⁻¹	—		1
	Zn-2-(2-吡啶基)苯并咪唑	C	—	—	(15~600)ng·ml⁻¹	—		1
	Zn-8-羟喹啉磺酸	C(E)	pH8.5	365/531	(0~0.6)μg·ml⁻¹	—	矿泉水	1,3
	Zn-间羟基甲醛甲硫氨酸	C	—	—	(0.4~400)ng·ml⁻¹			1
	Zn-罗丹明B-SCN^-	C(Q), C(E)	pH=3.5~4	—	(0.08~1.7)μg·ml⁻¹			1,3
	Zn-水杨醛甲酰腙	C	—	—	(0.1~2)%	—		1
	Zn-水杨醛二硫代甲酰腙	C	pH=8~10	365/480	(1~6)μg·ml⁻¹	—		1,3
	Zn-4-苯水杨基氨基苯并噻唑	C(E)	—	—	(0.5~100)ng·ml⁻¹			1
	Zn-β-(亚水杨基氨基)乙醇	C	pH5~6	375/440	(32~320)ng·ml⁻¹	30		1,3
	Zn-噻吩-2-醛-2-喹啉腙	C	—	—	(20~200)ng·ml⁻¹			1
	Zn-8-(甲苯对磺酰胺基)喹啉	C(E)	pH=8.0~8.3	—	(0.52~6.5)μg·ml⁻¹	—	矿物	1,3
Zr	Zr-桑色素	C	0.125mol·L⁻¹ H_2SO_4	359/505	(0~160)ng·ml⁻¹	2	地质样品	5
	Zr-桑色素-十二烷基硫酸钠	C	0.6mol·L⁻¹HCl	435/469	(0~2)μg·ml⁻¹	0.5	合金钢	5
					(0~50)ng·ml⁻¹	—		
	Zr-桑色素-十二烷基苯磺酸钠	C	—	420/500	—	50		5
	Zr-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH中性		—	1		5
	Zr-8-羟基喹啉-5-磺酸-EDTA	C	pH=5~7	360/500	(0.5~1000)ng·ml⁻¹	0.5	防腐液	5
	Zr-1,2-二羟基蒽醌-3-磺酸钠	C	—	410/530	(2~120)ng·ml⁻¹		合成样	4
	Zr-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸	C	pH6	370/500	(0~100)ng·ml⁻¹	3	合成样	4
	Zr-氯-7-碘-8-羟基喹啉-5-磺酸-EDTA-CTMAB	C	pH=5.5~7.0	365/500	(1.6~1000)ng·ml⁻¹	0.8	合金	39
	Zr-桑色素-CTMAB	C	0.12mol·L⁻¹ H_2SO_4	424/508	(0.5~200)ng·ml⁻¹	0.2	锆合金,矿石	40
	Zr-铬黄酸素蓝	C	pH3~5	350/405	(0.1~1)μg·ml⁻¹			1,3
	Zr-2′,4′-二羟基黄酮	C	5mol·L⁻¹HCl	338/520	(5~3000)ng·ml⁻¹	—		1,3
	Zr-黄酮醇	C	2mol·L⁻¹HCl	紫外光/480	(0.15~1.5)μg·ml⁻¹	—	矿物	1,3
	Zr-3-羟基色酮-SO_4^{2-}	C	—		(0~0.32)μg·ml⁻¹	—		1
	Zr-9-羟基芴酮	C(E)		紫外光/520	(0.11~1.1)μg·ml⁻¹	—		1,3
	Zr-桑色素	C	2mol·L⁻¹HCl	436/525	(20~400)ng·ml⁻¹	—	硅酸盐岩石	1,3
	Zr-槲皮黄酮	C	—		(50~500)ng·ml⁻¹	—		1
	Zr-桑精	C(E)	—	—	(2~3000)ng·ml⁻¹			1
	Zr-桑精-7-硫酸盐	C			(0.03~33)μg·ml⁻¹	—		1
	Zr-槲皮素	C	—	—	(40~160)ng·ml⁻¹			1
	Zr-2-吡啶荧光素	C		—	(0.030~0.9)ng·ml⁻¹			1
	Zr-4-取代苯基氨基安替比林	C	pH=1~3	紫外光/550	(0.03~10)μg·ml⁻¹	8		1,3
	Zr-2,4′,7-三羟基黄酮	C	—	410/525	(6~400)ng·ml⁻¹	3		1,3

本表参考文献：

1 S.G. Schulman. Molecular Luminescence Spectroscopy Methods and Applications. Part I. New York: Wiley, 1985: 371
2 陈国珍，黄贤智，朱世盛等. 分子发光分析法（荧光法和磷光法）. 上海：复旦大学出版社，1985. 215
3 陈国珍，黄贤智等编. 荧光分析法，第二版. 北京：科学出版社，1990
4 李河鸣，吕九如. 分析试验室，1991，10(4)：102
5 刘长松，魏雅芳，胡卫军. 分析试验室，1995，14(4)
6 罗柏英. 分析试验室，1986，5(3)：35
7 林贵贤，邵克武，卢金明. 分析化学，1992，20(7)：835
8 马会民，梁凤华，余席茂等. 分析化学，1992，20(9)：1061
9 蔡双喜，楼 波，史慧明. 分析化学，1993，21(11)：1340
10 江葆英，张书圣，黄山松. 分析化学，1993，21(8)：962
11 张晶玉，杨俊夫，任 英等. 分析化学，1993，21(12)：1457
12 宋功武，周建刚. 光谱学与光谱分析，1995，15(5)：79
13 王震平，杨杰斌. 分析化学，1996，24(5)：587
14 于 水，任 杰，丁劲鹏等. 分析化学，1995，23(11)：1267
15 王朋斌，宋功武. 理化检验-化学分册，1990，25(6)：352
16 王学公，叶春广. 浙江大学学报，1988，22(5)：21
17 邢 诚，刘 杰，朱宗宪. 分析化学，1990，18(6)：57
18 薛迎光，尚 军，温 龙. 理化检验（化），1995，25(3)：151
19 杨志平，赵春绿，杨昌旺等. 化学试剂，1994，16(5)：269
20 肖钦荣，徐俊育. 上海第二医科大学学报，1989，9(2)：138
21 何 蓉，陈树华，尹仲良. 生物化学与生物物理进展，1991，18(1)：77
22 廖 祥，张甲良，邓新生. 湖南医科大学学报，1993，18(2)：209
23 蒋家刚，陈德华，尹 红. 化学试剂，1992，14(1)：40
24 马会民，余席茂，于文鑫等. 化学试剂，1991，13(3)：137
25 许金钩，黄贤智，杨清峰等. 分析化学，1989，17(2)：140
26 樊晓红，郭 彬. 中国中药杂志，1989，14(2)：30
27 郭振光，张书勤，魏庆珍等. 吉林大学自然科学学报，1989，(4)：59
28 覃 岳，杨志华，黄坚锋. 分析化学，1991，21(1)：1
29 武建华，张新民. 分析化学，1986，14(8)：封三
30 崔万苍，朱 俐，孔令根等. 分析试验室，1988，7(3)：6
31 欧阳耀国，蔡继平，刘宏之等. 环境化学，1990，9(4)：55
32 周国平，刘 红，俞 英等. 高等学校化学学报，1994，15(5)：367
33 陈国生，刘 红，黄坚锋. 分析化学，1994，22(11)：1147
34 曾依洲，徐其亨. 分析化学，1991，19(2)：134
35 欧阳耀国，蔡继平，屠 娟等. 分析试验室，1986，5(5)：1
36 杨志斌，邵 强，邹治国. 分析测试学报，1995，14(1)：29
37 冯尚彩，盛文彬. 分析化学，1992，20(1)：52
38 徐国钢，曲宝禹. 分析化学，1992，20(8)：919
39 冯素玲，赵宝华，张梅霞. 分析化学，1995，23(10)：1230
40 冯尚彩，盛文彬. 分析化学，1991，19(7)：807
41 史海健，王志文，史好新. 分析化学，1995，23(2)：172
42 史好新，王志文，史海健. 分析化学，1993，21(4)：491
43 史海健，王志文，高旭芦等. 分析试验室，1995，14(5)：22
44 沈含熙，孙国平. 分析化学，1995，23(8)：894
45 蔡双喜，翟兰芳，史慧明. 分析化学，1989，17(8)：746
46 常 霞. 分析化学，1988，16(9)：840
47 张隆明，刘国新，李竹君. 高等学校化学学报，1988，9(5)：518
48 方惠斌，徐其亨. 化学试剂，1988，10(4)：216
49 谢顺义，闫 兰，俞庆华等. 分析化学，1993，21(12)：1384
50 潘利华，林建英. 光谱学与光谱分析，1994，14(5)：1
51 朱贵云，司志坤，王秀红. 分析化学，1991，19(12)：1[illegible]
52 常 岩，黄汉国. 理化检验（化），1995，31(2)：80
53 谭晓劲，李兰贞，黄杉国. 分析试验室，1993，12(5)：44
54 李红霞，黄汉国. 分析化学，1995，23(9)：1036
55 杨景和，朱贵云，李永祥. 山东大学学报（自），1989，24(3)：67
56 何家铿，任 英. 分析化学，1993，21(10)：1122
57 朱贵云，侯 玲，司志坤等. 分析化学，1992，20(2)：223
58 杨景和，朱贵云，司志坤等. 高等学校化学学报，1990，11(4)：387
59 司志坤，朱贵云，朱文祖. 高等学校化学学报，1990，11(10)：1158
60 姜 玮，司志坤，朱贵云. 分析化学，1994，22(12)：1252
61 朱贵云，司志坤，张 斌等. 光谱学与光谱分析，1995，15(4)：109
62 司志坤，朱贵云，张 斌等. 高等学校化学学报，1994，15(11)：1615
63 杨景和，任学贞，刘华能等. 理化检验（化），1991，27(6)：368
64 杨景和，朱贵云，黄善兵. 化学试剂，1988，10(4)：249
65 司志坤，胡 煦，陈马征等. 光谱学与光谱分析，1994，14(4)：7
66 司志坤，张敏同，尹长荣等. 分析化学，1994，22(4)：425
67 刘钧坤，曹政同. 高等学校化学学报，1995，16(4)：527
68 李建军，张凤柱，曹云明. 分析试验室，1991，10(3)：4
69 丁东鸣，杨 岩，黄汉国. 分析化学，1992，20(8)：980
70 杨志军，李照红，黄坚锋. 分析化学，1996，24(5)：535
71 黄晓洁，张改秀，曹云明等. 高等学校化学学报，1995，16(1)：47
72 卓桥东，于军峰. 高等学校化学学报，1996，17(4)：535
73 张世雄，赵本庆，贾康慧. 分析化学，1994，22(9)：919
74 曾 毅. 分析化学，1993，21(4)：464
75 张仁德，杨廷荣，王怀公. 化学试剂，1990，12(6)：330
76 王春阳，何心伟，王蓓蕾等. 分析化学，1994，22(7)：

722

77 于新建，张俊杰，黄汉国. 分析化学，1991；9(6)：645

78 王 岭，黄汉国. 分析化学，1994；22(4)：380

79 武兴德，何洪臣. 分析化学，1994；22(3)：322

80 张秀锦，余 辉. 厦门大学学报（自），1995；34(5)：782

81 黄民权，张兰华，丁怀公. 分析试验室，1997；6(12)：10

82 曾竹君，高健宗. 高等学校化学学报，1983；4(3)：294

83 Yun-xiang Ci Fang Wang. Anal. Chim. Acta，1990；233：299

84 艾 萍，徐其亨. 化学试剂，1990；12(5)：277

85 肖 英，曹平华，邱 武等. 化学试剂，1995；17(2)：47

86 高甲友，韩 省. 化学试剂，1991；13(5)：307

87 邹丽仙，松井高雄，斯琴高娃等. 分析化学，1995；23(4)：398

88 王孝铨，章竹君. 高等学校化学学报，1995；16(2)：188

89 焦世学，高坚健，俞 安等. 化学学报，1993；51：897

90 丁孝铨，章竹君. 分析化学，1995；23(3)：259

91 张 勇，张兰芳，周建伟. 理化检验（化），1995；31(1)：227

92 张桂凤，张 红，冯夏玲. 分析化学，1996；24(5)：532

93 黄丽红，王鸿芳，李明远. 分析化学，1993；21(5)：563

94 王俊德，陈 丰，汪敏建. 高等学校化学学报，1991；12(9)：1181

95 郑海华，李 平，赵福祥等. 化学试剂，1990；12(5)：303

96 张仁树，周耀会，王怀公. 分析化学，1992；20(7)：809

97 杨清贤，顾伟东，许金钦. 化学试剂，1991；13(1)：47

98 王国敏，周宇翔. 理化检验（化），1988；24(4)：212

99 郑春生，吴利秀，罗俊利等. 分析化学，1992；20(1)：91

100 张 敏，王竹花，陈 芳等. 分析测试学报，1994；13(3)：57

101 林炳南，李隆华. 分析化学，1995；23(5)：512

102 张贵荣，徐梅清，何锡文等. 分析化学，1994；22(10)：1006

103 杨景和，邹华彬，于华武等. 理化检验（化），1993；29(5)：274

104 杨志毅，范文娟，苏 东. 分析化学，1995；23(5)：575

105 张万龄，史慧明. 分析化学，1985；11(10)：775

106 于 永，丁功鹏，黄宏辉. 分析化学，1993；21(5)：381

107 陈小红，陈荆鑫. 分析化学，1991；19(9)：1022

108 郭列竹，谭东联，谭 弘等. 分析化学，1992；20(4)：415

109 陈永华，周 山. 分析化学，1986；21(1)：102

110 宋功武. 分析测试学报，1995；14(1)：85

111 朱秀云，杨景和，王 敏. 山东大学学报（自），1988；23(1)：56

112 胡继明，张淑娟，肖云霞. 光谱学与光谱分析，1990；10(2)：7

113 朱俊云，杨景和，孙海清. 分析化学，1989；17(8)：737

114 朱秀云，杨景和，尹淑华. 理化检验（化），1988；24(6)：325

115 刘少峰，侯红兵. 理化检验（化），1991；27(4)：241

116 马 明，杨继明. 食品与发酵工业，1989；(5)：28

117 张力苗，张 莉，史继明. 分析测试通报，1985；4(1)：18

118 胡继明，邓廷宁，曾云鹗. 高等学校化学学报，1987；8(12)：1076

119 谢云祥，丁民生，周若英. 分析化学，1981；9(6)：647

120 黄汉国，郭风祺，王锐安等. 分析试验室，1987；6(7)：24

121 杨云行，丁民生，周若英. 高等学校化学学报，1983；4(1)：115

122 潘利华，杜继贤，陈国英. 分析化学，1992；20(5)：57

123 张秀梅，徐 岩，黄汉国. 分析化学，1994；22(4)：422

124 马文元，杨景和，高凯榕. 分析化学，1995；23(2)：183

125 邢华东，刘 兰，刘海新等. 高等学校化学学报，1991；12(3)：315

126 夏心泉，马四军，赵书林等. 理化检验（化），1996；32(3)：157

127 王宏花，王春鹏，赵中 群. 分析化学，1996；24(6)：687

128 王 峰，黄汉国，谢进忠. 分析化学，1995；23(6)：668

129 杨新文，张 琪. 光谱学与光谱分析，1994；14(4)：113

130 杨云府，蒋文博，丁 彬等. 北京大学学报（自），1991，27(6)：656

131 罗显军，陈立同，曾肖国. 理化检验（化），1996；32(2)：105

132 俞 英，夏炳华，高坚健等. 分析化学，1995，23(8)：906

133 卢亦彪，朱寿佳，王怀公. 分析化学，1990；18(7)：633

134 卢世忠，朱寿佳，王怀公等. 理化检验（化），1991；27(6)：343

135 林秀云，程 辉，李能玲等. 理化检验（化），1995；31(2)：104

136 朱利中，戚志红，余 炯等. 高等学校化学学报，1995；16(11)：1594

137 M. Encarnación Ureña Pozo et al. Anal. Chem. 1987；59：1129

138 Ana M. Afonso et al. Analyst，1986；111(3)：327

139 常兰亿. 分析化学，1995；23(11)：1302

140 郑用熙，范映辛. 高等学校化学学报，1994；15(1)：35

141 杨清贤，许金钩，徐秀伟. 分析化学，1989；17(6)：507

142 鲁昌辉，杨嘉伟，张新名. 分析化学，1991；20(10)：1272

143 杨冰尼，孔宝锦. 环境化学，1985；4(4)：45

表 23-6 色谱-荧光法测定多核芳烃的条件[19]

被分析物	分离方法	固 定 相	流 动 相	λ/nm		检出限
				激发	荧光	
多核芳烃	TLC	Al_2O_3	戊烷-乙醚			
	TLC	Al_2O_3	环己烷-苯	似线状光谱		1ng
	TLC	纤维素	二甲基甲酰胺-水			
	TLC	纤维素	异辛烷	360	430~500	1ng
	TLC	醋酸纤维素	乙醇-甲苯-水			
苯并芘	TLC	醋酸纤维素	乙醇-CH_2Cl_2-水	366	407	$10^{-12}mol \cdot L^{-1}$
	TLC	纤维素+醋酸纤维素	甲醇-水-丙酮-乙醚			0.2ng/斑点
	TLC	醋酸纤维素	乙醇-二氯乙烷	360	430	
多核芳烃	TLC	Al_2O_3+醋酸纤维素	苯-己烷（第一向） 甲醇-乙醚-水（第二向）	366	420~500	$1ng \cdot ml^{-1}$
苯并芘	TLC	硅胶	乙醇-二氯甲烷（第一向） 吡啶-甲醇-水（第二向）	360	420	
	TLC	硅胶	庚烷-苯			5ng/10ml
	KX	聚酰胺	甲苯-甲醇	360	450	1ng
	HPLC	Partisil-10	甲醇-水-乙腈			
多核芳烃	HPLC	Zorbax ODS.	乙腈-水	240~280	370~470	(0.4~3) ng
	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙腈-水			
	HPLC	Lichrosorb SI60	己烷-二甲基亚砜			
Нитробезиларены	TLC	Силуфол	苯-乙醇			
Азаарены	TLC	纤维素	甲酸-水			
	TLC	硅胶	己烷-苯			
多核芳烃	HPLC	Lichrosorb RP-18	甲醇-水			$0.01\mu g \cdot kg^{-1}$
	TLC	硅胶，醋酸纤维素	各种体系			5ng/斑点
苯并芘	HPLC	Partisil	己烷-乙腈	365	404	4pg

表 23-7 色谱-荧光法测定霉菌毒素的条件[19]

被分析物	分离方法	固定相	流 动 相	λ/nm		检出限	被测浓度范 围
				激发	荧光		
黄曲霉素	TLC	硅胶	乙醚-甲醇-水；氯仿-丙酮	365	425~450	>0.2ng/斑点	
	TLC	硅胶	氯仿-丙酮-丙醇	365	425~450	0.5ng	(1~100)ng
	TLC	硅胶	氯仿-三氯代乙烯-异戊醇			0.5ng	
	TLC	Силуфол 硅胶	氯仿-苯-丙酮			(0.2~0.8)ng/斑点	
	TLC	Силуфол 硅胶	丙酮-氯仿； 乙酸乙酯-异丙醇-水				
	TLC	Силуфол	苯-甲醇-乙酸			$(1\sim5)\mu g \cdot kg^{-1}$	
	TLC	硅胶	苯-甲醇-乙酸			0.5ng	
	TLC	Силуфол	苯-己烷-乙醚； 氯仿-苯-丙酮			(0.2~0.5)ng/斑点	
	TLC	Адсорбосил	氯仿-丙酮-己烷	365	450		
	TLC	淀粉	甲苯-苯-环己烷-乙醇				
	TLC	Al_2O_3	氯仿-甲醇				
黄曲霉素 M_1	TLC	硅胶	氯仿-丙酮-异丙醇				
	TLC	硅胶	氯仿-丙酮-异丙醇(第一向) 甲苯-乙酸乙酯-甲酸(第二向)			0.7ng	(1~50)ng
	TLC	硅胶	氯仿-丙酮			$5\times10^{-12}mol \cdot L^{-1}$	
	TLC	硅胶 GHR	环己烷-石油醚-苯-氯仿-丙酮-乙腈-乙酸			1ng	
黄曲霉素 B_1 和 M_1	TLC	硅胶 GHR	乙醚-甲醇-水(第一向) 氯仿-丙酮-甲醇(第二向)	365~425		1ng	
	TLC	硅胶	乙醇-甲醇-水(第一向) 氯仿-丙酮-甲醇(第二向)			≈0.1ng	
黄曲霉素	HPTLC	硅胶 RP	氯仿-乙酸乙酯-乙醚				
黄曲霉素 M_1	HPTLC	硅胶 RP	甲醇-水			≈0.1ng/斑点	
黄曲霉素	微型柱	Al_2O_3-硅胶-合成硅酸镁载体	氯仿-乙腈-异丙醇			$\approx0.5\mu g \cdot kg^{-1}$	
	HPLC	Zorbax SIL	氯仿-二氯甲烷-异丙醇				
	HPLC	Partisil 100DS	甲醇-水-二甲基甲酰胺				

续表

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	被测浓度
				激发	荧光		范围
黄曲霉素	HPLC	μ-Bondapak-CN	乙腈-水	365	>400	≈20pg	
	HPLC	Lichrosorb	氯仿-环己烷-乙腈-乙醇			0.05ng	(0.5～60)ng
	HPLC	硅胶	甲苯-乙酸乙酯-甲酸-甲醇				(0.3～120)ng
赭曲霉素	TLC	硅胶 60	氯仿-丙酮(第一向) 甲苯-乙酸乙酯-甲酸(第二向)				
	TLC	硅胶 60	甲苯-乙酸乙酯-乙酸			≈100ng	
	TLC	硅胶 60	氯仿-甲醇-甲酸-水	340～390	445～475		
	TLC	硅胶 60	甲苯-乙酸乙酯-甲酸			20μg·kg^{-1}	
	TLC	Al_2O_3	氯仿-乙酸乙酯-乙酸				
	TLC	淀粉	苯-甲苯-环己烷-乙醇				
	HPLC	Lichrosor RP-8	乙腈-磷酸-水			1μg·kg^{-1}	
	HPLC	Spherisorb ODS	甲醇-乙酸-水	340	470		
香豆素	纸色谱	瓦特曼纸	丁醇-乙酸-水(第一向) 乙酸-水(第二向)				
	TLC	硅胶	氯仿-甲醇-甲苯	366			
	HPLC	Zorbax ODS	乙酸盐缓冲液(pH4.0)				
	HPLC	μ-Porasil	氯仿-己烷				
玉米赤霉烯酮	TLC	硅胶 H	甲苯-乙酸乙酯-乙酸			≈10ng	
	TLC	硅胶 H	氯仿-丙酮				
	TLC	硅胶 60	氯仿-丙酮(第一向) 甲苯-乙酸乙酯-甲酸(第二向)			≈50μg·kg^{-1}	
	HPLC	Lichrosorb SI60	氯仿-异辛烷				
	HPLC	Bondapak C_{18}	乙醇-水			1ng	
桔霉素	TLC	硅胶	苯-乙酸	365	505		10～100ng/斑点
	TLC	硅胶	甲苯-乙酸乙酯-甲酸			10ng	
	TLC	硅胶	甲苯-乙酸乙酯-乙酸	336	520		
Веррукарин	TLC	硅胶	乙醇-乙酸乙酯-丙酮				
Роридин		A_2O_3					
孢子镰刀毒素		Силуфол,硅胶	石油醚-乙醚-乙酸				
霉菌毒素混合物	TLC	硅胶	苯-乙醇-甲酸				
	TLC	硅胶	各种体系				
	TLC	硅胶 G60	氯仿-苯(第一向) 甲苯-乙酸乙酯-甲酸(第二向)				

表 23-8 色谱-荧光法测定某些生物活性物质的条件[16]

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	被测浓度
				激发	荧光		范围
卟啉	TLC	硅胶	苯-乙醇-甲醇	365	600		
	TLC	硅胶	CCl_4-CH_2Cl_2-乙酸乙酯-丙酸乙酯			≈2ng	
	HPLC	μ-Bondapak	乙腈-磷酸盐缓冲液(pH7.5)	399	620	≈0.5ng(样品中)	
	HPLC	硅胶	丙酮-乙酸-水	406	600	0.5ng(样品中)	
	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	甲醇-乙酸-水	365	595	<1ng	
叶绿素	TLC	硅胶	石油醚-乙酸乙酯-二乙胺				
核酸,核苷酸	TLC	纤维素	LiCl 溶液(第一向) 甲酸盐缓冲液(pH3.4)(第二向)				
核苷酸	TLC	硅胶	丙醇-25%氨(第一向) 异丙醇-$(NH_4)_2SO_4$ 溶液(第二向)				
核苷	TLC	硅胶,葡萄糖凝胶	磷酸盐缓冲液(pH7.0)				
嘌呤碱	TLC	纤维素+聚亚乙基亚胺	碳酸氢盐缓冲液(pH7.6)				
奎尼定等	TLC	硅胶	氯仿-乙酸乙酯-异丙醇-乙二胺	365	455	10ng	
	TLC	硅胶	氯仿-甲醇-二乙胺(第一向) 环己烷-己烷(第二向)				

续表

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm 激发	λ/nm 荧光	检出限	被测浓度范围
奎尼定等	TLC	硅胶 60	苯-二噁烷-乙醇-25%氨	366	456		至 12μg · ml^{-1}
	HPTLC	硅胶 60	苯-乙酸乙酯-甲醇-吡啶	360	455	10ng	
	HPLC	μ-Bondapak	乙腈-四氢呋喃-磷酸盐缓冲液	254	340	10ng	
罂粟碱	TLC	硅胶	苯-乙醇				
西萝芙木碱	HPTLC	硅胶 G60	甲基乙基酮-庚烷	380	450	<500ng	
生物碱	TLC	硅胶 G60	乙醇-氯仿				
麦角	HPTLC	硅胶 G60	四氢呋喃-二异丙醚-甲苯-二氯乙烷	325	420	≈1ng	
	HPLC	Spherisorb ODS	甲醇-磷酸盐缓冲液(pH8)	320	400		
核黄素	TLC	硅胶	吡啶-乙酸-水	360	420	10ng/样品	
	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	甲醇-磷酸盐缓冲液(pH5)			50ng · ml^{-1}	至 10μg · ml^{-1}
生育酚	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	甲醇-水	296	330		
	HPLC	μ-Porasil	己烷-二异丙醚	295	370	2×10^{-11}mol · L^{-1}	
芸香苷	TLC	硅胶+H_3BO_3	乙酸乙酯-甲酸-水			100ng	
睾丸甾酮	TLC	硅胶+H_3BO_3	氯仿-乙酸乙酯	360	590	10ng	
雌性激素	LC	Al_2O_3	甲醇-苯				
雌三醇	HPLC	反相 C_{18}	乙腈-水				
四环素	TLC	硅胶+聚乙二醇 400	二氯甲烷-甲酸乙酯-乙酸缓冲液(pH4.7)			≈100ng	
	TLC	纤维素	甲醇-$MgCl_2$ 溶液				
争光霉素等(抗肿瘤药)	亲合色谱	KMH-瓦特曼纸	NaCl 溶液-缓冲液(pH1.5)-水	300	395		
灰黄霉素等	HPTLC	硅胶 60	乙酸丁酯-丙酮			150ng · ml^{-1}	
	HPLC	Lichrosorb RP-8	乙腈-水			25ng · ml^{-1}	
亚德里亚霉素等(抗肿瘤药)	HPLC	Lichrosorb RP-2	乙腈-磷酸-水	470	585	10ng · ml^{-1}	
潘生丁	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	甲醇-乙酸-水	285	470		
Буметанид[②]	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	甲醇-乙酸-水	340	425	≈9ng · ml^{-1}	
心得安	HPLC	LichrosorbRP-8	乙腈-甲醇-磷酸盐缓冲液	310	430	≈2ng · ml^{-1}	
速尿灵等	TLC	硅胶 60	氯仿-乙酸乙酯-甲酸	365	436	≈1ng	
三氨苯蝶啶等(利尿抗压药)	TLC	硅胶 60	乙酸乙酯-甲醇-25%氨	340	480	<20ng	
安定	TLC	硅胶 60	氯仿-异丙醇-25%氨	380	440	≈10ng	
血小板素	HPLC	Micropak C_{18}	乙腈-氯酸-水	220	350		(20~300)ng
乙菌定	TLC	硅胶	氯仿(第一向) 己烷-丙酮(第二向)			2μg/样品	
柏拉息昂[①](1605 农药)	TLC	硅胶+草酸	乙醚			70ng	
西维因[①]	TLC	硅胶	氯仿(第一向) 己烷-丙酮(第二向)				

① 水解后分析。

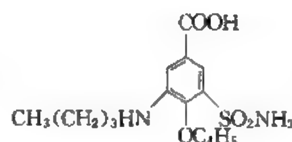
② 英文为 bumetanide,结构式为  ,是一种利尿剂。

表 23-9 色谱-荧光法测定胺的条件[19]

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm 激发	λ/nm 荧光	检出限	被测浓度范围
胺	TLC	胶硅	丹磺酰氯 各种体系	360	≈500	10^{-12} mol · L^{-1}	(10^{-12} ~ 10^{-11})mol · L^{-1}
	TLC	硅胶	乙酸乙酯-环己烷(第一向) 苯-三乙胺(第二向)				
生物胺	TLC	硅胶	CCl_4-甲基溶纤剂-邻乙二醇	360	490		
多胺	TLC	硅胶 60	氯仿-三乙胺	340	505		

续表

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	被测浓度范围
				激发	荧光		
仲胺	TLC	силуфол，硅胶	氯仿-苯-乙酸乙酯-乙酸	360～370	475～490	5ng/斑点	12～180ng
胺	TLC	聚酰胺，硅胶	氯仿-二噁烷-异丙醇				
药物	TLC	硅胶 60	环已烷-异戊醇			≈1ng/斑点	
多胺	TLC	硅胶 GF	环己烷-乙醚；氯仿-三乙胺				
烯丙胺等	TLC	силуфол，硅胶	氯仿-苯-乙酸乙酯-乙酸	355	490	1ng/斑点	3～70ng/斑点
巴比土酸盐	TLC	硅胶	氯仿-丙酮			<2ng/斑点	2～500ng/斑点
氨基己糖	TLC	硅胶	环已烷-乙酸乙酯-乙醇				
血小板素等	TLC	硅胶 G	环已烷-乙酸乙酯；氯仿-三乙醇胺				10^{-7}mol・L^{-1}/斑点
苯基乙胺	TLC	硅胶 G	苯-甲醇			2×10^{-11}mol・L^{-1}	
生物胺	TLC	Al_2O_3	苯-丙酮-乙酸乙酯；氯仿-甲醇			10^{-12} mol・L^{-1}	10^{-12}～10^{-11}mol・L^{-1}
氨基甲酸苯酯①	HPLC	Zipax	甲醇-己烷-水				
氨基甲酸甲酯①	HPLC	Corasil	己烷-丙酮				
有机磷酸酯①	HPLC	硅胶	氯仿-己烷				
亚硝胺	TLC	Силуфол，硅胶	氯仿-苯-乙酸乙酯-乙酸	360～370	475～490	10ng/斑点	25～200ng/斑点
			HБЛ-氯				
胺	TLC	硅胶 60	环已烷-乙酸乙酯；石油醚-氯仿-乙醚-乙酸	464	527	≈10ng/斑点	
	TLC	聚酰胺	庚烷-乙酸乙酯-丁醇			≈10ng/斑点	
仲胺	TLC	Силуфол，硅胶	氯仿-苯-乙酸乙酯-乙酸	468～475	520～534	≈1ng 斑点	(4～90)ng/斑点
苯基乙胺	TLC	硅胶 G	氯仿-四氢呋喃	468	520	(1～10)ng/斑点	
生物胺	TLC	硅胶 G	环已烷-乙酸乙酯-乙醚；石油醚-氯仿-乙醚-乙酸			10^{-10} mol・L^{-1}	
胺	TLC	硅胶 60	乙酸乙酯-环已烷				
胺，药物	TLC	硅胶 G	氯仿-甲醇				
胺，药物	HPTLC	硅胶 G，60F	甲苯-甲醇-乙酸			≈25ng/斑点	
生物胺(分解后)	TLC	硅胶 G	氯仿-甲醇-25%氨	460～470	510～530		
胺	HPLC	Zipax	四氢呋喃-己烷			≈1ng/样品	
胺	HPLC	Zorbax SG	庚烷-丁醇-乙酸乙酯			0.5ng/样品	
氨基甲酸苯酯①	TLC	硅胶	氯仿-四氢呋喃				
	HPLC	Zipax	四氢呋喃-苯			1ng/样品	
亚硝胺(去亚硝后)	TLC	Силуфол，硅胶	氯仿-苯-乙酸乙酯-乙酸	468～475	520～534	(2～5)ng/斑点	(8～120)ng/斑点
亚硝胺(去亚硝后)	TLC	硅胶	环已烷-乙酸乙酯	>366	516	≈5ng/斑点	
亚硝胺(去亚硝后)	HPLC	硅胶	环已烷-乙酸乙酯-异丙醇			≈0.5ng/样品	
	TLC	聚酰胺	庚烷-乙酸乙酯-丁醇	464	527	15ng/斑点	
	HPLC	薄膜聚酰胺珠	庚烷-丁醇				
			荧胺				
芳香胺(分解后)	TLC	硅胶	苯-乙醇				(4～30)ng
脂肪胺(分解后)	TLC	硅胶	丁醇-乙酸乙酯-乙酸-水			<100ng	
	TLC	硅胶	乙酸乙酯-甲醇-25%氨			≈ 100ng ml^{-1}	
二元胺(分解后)	TLC	硅胶	氯仿-乙酸乙酯-乙醇-乙酸	390	500	1ng/斑点	
胺	TLC	硅胶	乙酸乙酯-己烷-甲醇-水				
生物胺	TLC	硅胶 60	丁醇-乙酸-水			$<4\times10^{-12}$ mol・L^{-1}	
去甲肾上腺素	TLC	硅胶 60	苯-甲醇	390～400	490～515		
氨基吲哚	TLC	硅胶 60	丙酮-己烷			2×10^{-12}mol・L^{-1}	
药物	HPTLC	硅胶 G60F	氯仿-环己烷-甲醇				
胺(分解后)	KX	KM 纤维素	硼酸盐缓冲液 pH9-NaCl 溶液	390	475	$<10^{-10}$ mol・L^{-1}	

续表

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	被测浓度范围
				激发	荧光		
药物(分解后)	HPLC	硅胶 RSIL C_{18}	磷酸盐缓冲液 pH7-乙腈	385	480		(10～100) μg · ml⁻¹
麻黄碱等	TLC	硅胶	甲苯-甲醇-丙酮				
药物,胺	HPTLC	硅胶 G60	甲苯-甲醇-乙酸				20ng/斑点
胺	HPTLC	硅胶 G60	氯仿-乙酸-水; 乙酸甲酯-异丙醇-25%氨				
组胺等	KX	Amberlite IRC-50	四氢呋喃-丙酮-甲醇			10^{-11} mol · L^{-1}	
多胺	HPLC	Lichrosorb RP-8	甲醇-水	340	505	$<2\times10^{-11}$ mol · L^{-1}	
	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙腈-乙酸-甲醇-水				
	HPLC	Corasil	氯仿-三乙胺				
	HPLC	Micropak CN-10	环己烷-二氯甲烷-异丙醇				
	HPLC	Micropak CN-10	乙腈-水	342	512	3×10^{-11}mol · L^{-1}	
麻黄碱	HPLC	硅胶 SIL	二异丙醚-异丙醇-氨			< 0.1μg · ml^{-1}	
庆大霉素	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙腈-水			≈5ng/样品	
生物胺	HPLC	Lichrosorb Si-100	乙酸乙酯-环已烷				
氨基甲酸苯酯①	TLC	硅胶	氯仿-己烷			40ng/斑点	
	TLC	硅胶 60	苯-三乙胺-丙酮			20ng/斑点	
氨基甲酸甲酯①	TLC	硅胶 60	苯-丙酮			≈10ng/斑点	
三嗪①	TLC	硅胶 60	己烷-氯仿			≈10ng/斑点	
有机磷酸酯①	TLC	硅胶 60	苯-丙酮			≈20ng/斑点	
多胺	HPLC	Vydac 205	甲醇-磷酸盐缓冲液 pH8-水			≈ 2.5×10^{-11} mol · L^{-1}	
	HPLC	Lichrosorb	甲醇-NH_4Cl 溶液-乙酸			≈ 10^{-11} mol · L^{-1}	
氨基甲酸苯酯(水解和分解后)	TLC	硅胶	苯-乙醇				
亚硝胺(紫外光辐照和分解后)	TLC	硅胶	己烷-乙醚-二氯甲烷			(10～500) ng/斑点	
			[illegible]磺酰氯				
胺	TLC	硅胶	CCl_4-氯仿				

① 水解后。

表 23-10　色谱-荧光法测定氨基酸的条件[19]

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	被测浓度范围
				激发	荧光		
			丹磺酰氯				
氨基酸	TLC	硅胶	各种体系	～360	～500	10^{-11}mol · L^{-1}	
	TLC	硅胶	丙酮-异丙醇-25%氨(第一向) 氯仿-乙酸乙酯-乙酸(第二向)				
	TLC	聚酰胺	乙醇-25%氨(第一向) 苯-吡啶-乙酸(第二向)	350～370	490～530		
	TLC	聚酰胺	吡啶-水-乙酸(第一向) 苯-乙酸(第二向)				
氨基酸,肽	TLC	聚酰胺	乙酸乙酯-甲醇-乙酸				$(10^{-10}～10^{-8})$ mol · L^{-1}
	TLC	聚酰胺	甲酸(第一向) 苯-乙酸(第二向)			< 10^{-10} mol · L^{-1}	
酪氨酸等	TLC	硅胶	氯仿-乙醇-乙酸				
4-氨基丁酸	TLC	硅胶	苯-环已烷-甲醇				$(10^{-11}～10^{-10})$mol · L^{-1}
氨基酸	TLC	Al_2O_3	苯-丙酮-乙酸乙酯(第一向) 氯仿-甲醇(第二向)				

续表

被分析物	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	被测浓度范围
				激发	荧光		
氨基酸							
	HPTLC	硅胶 60F	氯仿-乙酸(第一向) 乙酸甲酯-异丙醇-氨(第二向)				
	HPTLC	硅胶 RP-2F	甲醇-乙酸	366	≈500		
	KX	硅胶 PRS	甲醇-磷酸-水	345	545	≈1ng/样品	
	KX	聚酰胺	苯-乙酸				
苯胺等	KX	RP-8	乙腈-磷酸-水				
氨基酸	IEC	Amberlite IRC-50	四氢呋喃-乙酸盐缓冲液 pH4			≈ 10^{-10} mol · L^{-1}	
氨基酸	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙腈-水-磷酸盐缓冲液(pH7.2)				
	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙腈-Tris Buffer pH7.7①				
	HPLC	Lichrosorb SI60	苯-吡啶-乙酸			< 10^{-10} mol · L^{-1}	
	HPLC	Zipax	甲乙酮-石油醚				
	HPLC	Адсорбосил RP-8	乙腈-乙酸-磷酸-丙酮	>300	545	1ng/样品	
组氨酸等	HPLC	Lichrosorb RP-8	Na_2HPO_4 溶液-甲醇	340	520	< 10^{-10} mol · L^{-1}	
精氨酸等	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	Na_2HPO_4 溶液-乙腈				
己氨酸等	HPLC	Zorbax RP-8	乙腈-乙酸盐缓冲液 pH7.2	340	500	1μg · ml^{-1}	至 50μg · ml^{-1}
			НДБ-氯				
氨基酸	TLC	硅胶 G	氯仿-甲醇				
肽	TLC	Силуфол	异丙醇-水			≈ 10^{-9} 斑点	
脯氨酸等	IEC	Amberlite	乙酸盐缓冲液 pH3.8	465	535	< 5×10^{-10} mol · L^{-1}	
亚硝基脯氨酸(去亚硝后分解前)	TLC	硅胶	丁醇-乙酸乙酯				
	HPLC	硅胶	己烷-乙酸乙酯-乙酸			<5ng	
			荧胺(分解后)				
氨基酸	TLC	硅胶	丁醇-乙酸乙酯-乙酸-水	390	475	5×10^{-10} mol · L^{-1}	
肽	TLC	硅胶	丁醇-乙酸-水				
组氨酸等	TLC	硅胶	丁醇-乙酸-水				($0.4\sim6\times10^{-11}$) mol · L^{-1}
酪氨酸等	TLC	纤维素	异丁醇-3%氨				
			曼磺酰氯				
	TLC	聚酰胺	苯-乙酸(第一向) 乙醇-乙酸-水(第二向)				
			迪磺酰氯				
	TLC	硅胶	丙酮-异丁醇-25%氨			< 10^{-7} mol · L^{-1}	
			НТФИ				
	TLC	聚酰胺	甲苯-戊烷-乙酸(第一向) 乙酸-水(第二向)			< 10^{-10} mol · L^{-1}	
			ФИБ				
	TLC	聚酰胺	乙酸-水(第一向) 苯-丙酸(第二向)			< 10^{-7} mol · L^{-1}	

① Tris Buffer 指用 2-氨基-2-羟甲基-1,3-丙二醇 (tromethamine, $HOCH_2-C(NH_2)(CH_2OH)-CH_2OH$) 与盐酸制备的缓冲溶液。

表 23-11　色谱-荧光法测定酚、氨基酚、醛、酮、酸和硫醇的条件[19]

被分析物	试剂	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限
					激发	荧光	
酚	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-三乙胺	360	530	≈10^{-12}mol·L^{-1}
雌激素	丹磺酰氯	TLC	硅胶	氯仿-苯-乙醇			5ng/斑点
	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-乙酸乙酯			2ng/斑点
	丹磺酰氯	HPTLC	硅胶 60F	氯仿-二噁烷-异辛烷			(5～10)ng
	丹磺酰氯	HPLC	Lichrosorb SI60	庚烷-氯仿			≈40ng
Бутофенил	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-乙酸乙酯			
	丹磺酰氯	TLC	硅胶	环己烷-乙酸乙酯(第一向) 氯仿-三乙胺(第二向)			
酚性联苯	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-氯仿			5ng/斑点
	丹磺酰氯	HPLC	硅胶	己烷-氯仿			(1～5)ng/样品
药物	丹磺酰氯	TLC	硅胶 G	氯仿-苯-乙醇			(1～10)ng/斑点
	丹磺酰氯	HPTLC	硅胶 60F	氯仿-二噁烷-乙酸乙酯 25%氨			20ng/斑点
	丹磺酰氯	TLC	硅胶 S	苯-丙酮			≈1ng/斑点
大麻醇	丹磺酰氯	TLC	硅胶	甲醇-水	365		
杀虫剂，其中包括有机磷杀虫剂(水解后)	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-乙酸(第一向) 苯-丙酮(第二向)			<100ng/样品
杀虫剂	丹磺酰氯	HPLC	Zipax	氯仿-己烷			(5～10)ng/样品
氨基酚	丹磺酰氯	TLC	硅胶	乙酸丁酯-环己烷(第一向)CCl_4-三乙胺(第二向)	365	500	≈10^{-11}mol·L^{-1}
	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-三乙胺			
	丹磺酰氯	TLC	硅胶	环己烷-乙酸乙酯(第一向)氯仿-三乙胺(第二向)			
酪胺等	丹磺酰氯	TLC	Силуфол，硅胶	氯仿-苯-乙酸乙酯-乙酸	364	505	3ng/斑点
	丹磺酰氯	TLC	硅胶	环己烷-乙酸乙酯(第一向)苯-三乙胺(第二向)			
肾上腺素等	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-甲醇			
	丹磺酰氯	HPLC	硅胶 SI-100	二异丙醚-异丙醇-25%氨			
杀虫剂	丹磺酰氯	TLC	硅胶	苯-乙醚			
酪胺(分解后)	荧胺	HPLC	Lichrosorb RP-18	乙腈-磷酸盐缓冲液 pH7			<50ng·ml^{-1}
	НБД-氯	TLC	硅胶 G	氯仿-甲醇-25%氨	365	>465	
甾酮类	丹磺酰肼	TLC	Al_2O_3	二噁烷-氯仿	366	525	<10^{-9}mol·L^{-1}
睾丸甾酮等	丹磺酰肼	TLC	硅胶 G	乙醇-氯仿	360	510	10ng·ml^{-1}
糖类	丹磺酰肼	TLC	Anasil G	苯-吡啶-乙酸	365	510	≈10^{-9}mol·L^{-1}/斑点
氢可的松	丹磺酰肼	HPLC	Lichrosorb SI-60	二氯乙烷-丁醇-水	340	470	<5ng·ml^{-1}
可的松	丹磺酰肼	HPLC	Hitachi Gel	二氯甲烷-乙醇-水	350	505	0.5ng
酮类	曼磺酰氯	TLC	硅胶	氯仿-环己烷-吡啶	360		
醛、酮	①	纸色谱	瓦特曼纸+凡士林	甲醇-水			2ng/斑点
药物、甾酮类(分解后)	①	HPTLC	硅胶 G60F	二氯甲烷-甲醇			200ng/斑点
	②	HPLC	Hitachi Gel	己烷-甲醇			
脂肪酸	③	TLC	硅胶 G	氯仿-甲醇	360	420	5×10^{-11}mol·L^{-1}
杀虫剂	③	TLC	硅胶 G	苯-乙酸乙酯	350	420	2.5×10^{-11}mol·L^{-1}
药物	③	TLC	硅胶 G	氯仿-甲醇			
前列腺素	③	TLC	硅胶 G	苯-乙酸乙酯			20ng
	③	HPLC	Micropak SN-10	氯仿-异辛烷-甲醇	340	425	
脂肪酸	③	HPLC	Nucleosil C_{18}	甲醇-水	340	420	
	④	HPLC	Lichrosorb RP-8	乙腈-水			
硫醇	⑤	HPLC	硅胶 C_{18}	甲醇-缓冲液 pH8.8	360	435	
	⑥	HPLC	Nucleosil C_{18}	乙腈-磷酸盐缓冲液 pH8.2	338	540	1.5×10^{-11}mol·L^{-1}

① 2-苯乙酰基-1,3-茚二酮-1-肼。
② 异菸肼。
③ 4-溴甲基-7-甲氧基香豆素。
④ 9-蒽基二重氮甲烷。
⑤ 9-吖啶马来酰亚胺。
⑥ 1-丹酰氮丙啶。

表 23-12　基于环化和缩合反应的色谱-荧光测定条件[19]

被分析物	试剂	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	可测浓度范围
					激发	荧光		
生物胺	邻苯二甲醛(分离后)	TLC	硅胶	氯仿-乙醇-乙酸	350	480	≈1ng	
	邻苯二甲醛(分离后)	TLC	硅胶	氯仿-甲醇-25%氨	350	470		
	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙酸-甲醇-水	340	418	10^{-12} mol·L^{-1}	
生物碱	邻苯二甲醛(分离后)	TLC	Силуфол,硅胶	乙酸乙酯-甲醇	363	470	≈1ng	(10～200)ng
南美仙人掌毒毒碱,苯异丙胺	邻苯二甲醛(分离后)	HPTLC	硅胶 60	甲醇-乙酸乙酯-甲酸			10^{-12} mol·L^{-1}	
伯胺,氨基酸	邻苯二甲醛(分离后)	LC	DC-4A 树脂	柠檬酸盐缓冲液(pH=2.9～6.9)			5×10^{-10} mol·L^{-1}	
多胺	邻苯二甲醛(分离后)	LC	DC-6A 树脂	柠檬酸盐缓冲液			≈10^{-9}mol·L^{-1}	
儿茶酚胺	邻苯二甲醛(分离后)	LC	Amberlite CG-50	EDTA-$HClO_4$-水				
生物胺	邻苯二甲醛(分离后)	LC	Amberlite CG-50	磷酸盐缓冲液-10 mol·L^{-1}HCl	360	480	1ng	
氨基己酸	邻苯二甲醛(分离后)	LC	HCB-8 树脂	柠檬酸锂缓冲液			10^{-9} mol·L^{-1}	
肽	邻苯二甲醛(分离后)	IEC	PA-35 树脂	吡啶-乙酸盐缓冲液				
色胺,色氨酸等	邻苯二甲醛(分离后)	IEC		柠檬酸锂缓冲液	350	480	≈10^{-9}mol·L^{-1}	
3-氨基-丙烷-1,1,3-三羧酸酯	邻苯二甲醛(分离后)	IEC	Dowex 1-X5	$MgCl_2$ 溶液	340	445	10^{-7} mol·L^{-1}	(10^{-6}～10^{-4}) mol·L^{-1}
伯胺,氨基酸	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	DC-6A 树脂	柠檬酸盐缓冲液(pH5.7)-NaCl 溶液			≈10^{-12} mol·L^{-1}	
伯胺,氨基酸	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	Partisil10SCX	柠檬酸锂缓冲液			≈10^{-12} mol·L^{-1}	(10^{-11}～4×10^{-9}) mol·L^{-1}
5-羟基色氨酸	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	多孔性强酸型阳离子交换树脂 AminexA-5	乙酸缓冲液-乙酸(pH5)	360	480		至 5×10^{-8} mol·L^{-1}
4-氨基丁酸	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	DC-4A 树脂	柠檬酸盐缓冲液(pH5.0)			3×10^{-12} mol·L^{-1}	(7×10^{-12}～8.3×10^{-10}) mol·L^{-1}
组胺等	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	Nucleosil 10-C_{18}	甲酸-水	340	455	1ng·ml^{-1}	
组胺等	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	Nucleosil 10-5A	柠檬酸盐缓冲液(pH4.0)			5×10^{-10} mol·L^{-1}	
	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	DC-6A 树脂	NaCl 溶液-甲醇	340	455	≈10^{-9}mol·L^{-1}	(2×10^{-8}～10^{-6}) mol·L^{-1}
吲哚	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	Partisil 10 SCX	磷酸盐缓冲液(pH2.3)	370	478		
组氨酸等	邻苯二甲醛(分离后)	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	己磺酸钠溶液(pH3.2)	340	440		(10^{-7}～10^{-5}) mol·L^{-1}
氨基酸	邻苯二甲醛(分离后)	氨基酸分析仪	DC-6A 树脂	柠檬酸盐缓冲液			10^{-12} mol·L^{-1}	
脂肪族伯胺	邻苯二甲醛(分离后)	GLC	Chromosorb W-HP 上 3%的 OV-17		360	≈485		(2×10^{-9}～8×10^{-8}) mol·L^{-1}
氨基酸,牛磺酸	邻苯二甲醛(分离前)	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	水-乙腈-磷酸盐缓冲液(pH8.2)	300	385～470	≈10^{-10} mol·L^{-1}	(10^{-9}～2×10^{-7}) mol·L^{-1}
组胺等	邻苯二甲醛(分离前)	HPLC	Lichrosorb RP-18	NaCl 溶液-0.1mol·L^{-1}HCl-甲醇	335	445		
组胺等	邻苯二甲醛(分离前)	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙酸-甲醇-水	350	460		(0.25～9) ng/样品
氨[羟]丁卡那霉素	邻苯二甲醛(分离前)	HPLC	硅胶 C_{18}	甲醇-水-EDTA			<1μg·ml^{-1}	

续表

被分析物	试剂	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	可测浓度范围
					激发	荧光		
氨基甲酸盐	邻苯二甲醛(水解及分离后)	HPLC	Zorbax C_8	乙腈-水			≈1ng	
Нуфлими-новая	邻苯二甲醛(水解及分离后)	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	二噁烷-水			≈(12～50)ng	
кислота①	HCOH+H_2SO_4(分离后)	TLC	硅胶 60	氯仿-甲醇-甲酸	365	430	10ng/斑点	
лyфенаминов-аякислота②	HCOH+HCOOH(分离后)	TLC	硅胶 60	氯仿-甲醇	365	445		(0.5～10)μg·ml^{-1}
吲哚	HCOH+NaOH(分离后)	TLC	硅胶	乙酸甲酯-异丙醇-25%氨			2ng/斑点	
氨基抗菌素	HCOH+乙酰丙酮(分离后)	IEC	Amberlite IRC-50	氨-水	421	488		至 500ng·ml^{-1}
伯胺	嵌二萘-1-醛(分离前)	TLC	硅胶	乙酸乙酯-丁醇	450	500		(1～25)ng/斑点
氨基酸	木糖+酸(分离后)	纸色谱	Partisil	丁醇-乙酸(第一向)酚-间二甲苯(第二向)				
氨基酸,肽	2-甲氧基-2,4-二苯基呋喃-3-OH(分离前)	HPLC	Partisil-PXS	丙酮-水	390	475	≈10^{-6}mol·L^{-1}	
酪胺等	α-亚硝基-β-萘酚(分离前)	TLC	纤维素 MN30	乙醇-乙酸-水	460	570		
糖	乙二胺+硫酸(分离后)	纸色谱	瓦特曼纸№1	正丁醇-吡啶-水	394	470	≈100ng	
醛	邻-氨基联苯+硫酸(分离后)	TLC	硅胶	乙酸乙酯-异丙醇-乙酸-水			1ng	
丙烯醛	间-苯二胺+盐酸(分离前)	TLC	Силуфол 或硅胶	异丙醇-乙酸-水			50ng·$5ml^{-1}$	
乙醛糖	邻氨基苯磺酸+磷酸(分离后)	TLC	硅胶	正丙醇-丙酮-水			(0.1～0.5)nmol·L^{-1}/斑点	
醛等	邻-联苯酚+硫酸(分离后)	LC	Amberlite CG400	磷酸盐缓冲液(pH6.0)	405	465		
α-甲基酮	N-甲基萘酸酰胺(分离后)	HPLC	Partisil 10 SAX	磷酸盐缓冲液(pH5.5)			≈5×10^{-12}mol·L^{-1}	
萘醌	苯磺酸+盐酸(分离前)	TLC	Силуфол	己烷-二噁烷			≈10ng	
多元羧酸	间苯二酚+硫酸(分离前)	TLC	硅胶	氯仿-甲醇-25%氨	430	480		
二异氰酸酯	1-萘甲胺(分离前)	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	乙腈-水				
散霉素	苯胺(分离后)	TLC	硅胶 60	戊烷-乙酸乙酯(第一向)异丙醚-戊烷-乙醇(第二向)			4ng	

① Niflumic acid,是一种消炎药,结构式为 (苯环)-NH-(苯环)，COOH，CF_3 。

② Flufenamic acid,一种止痛药结构式为 (吡啶环,N)-NH-(苯环)，COOH，CF_3 。

表 23-13 利用氧化、还原等反应进行色谱-荧光测定的条件[19]

被分析物	试剂	分离方法	固定相	流动相	λ/nm		检出限	可测浓度范围
					激发	荧光		
硫胺素等	$K_3[Fe(CN)_6]$(分离后)	HPLC	Shimadzu ISA	醋酸盐缓冲液	375	435		
	$K_3[Fe(CN)_6]$(分离前)	HPLC	Lichrosorb	甲醇-乙醚	365	440	30ng·ml^{-1}	
	$K_3[Fe(CN)_6]$(分离前)	HPLC	Spherisorb	氯仿-甲醇	367	440	0.02ng	
	溴化氰+NaOH(分离后)	HPLC	Lichrosorb C_{18}	乙腈-磷酸盐缓冲液(pH8.4)	375	435	5×10^{-13} mol·L^{-1}/样品	
生物胺	$K_3[Fe(CN)_6]$(分离后)	LC	Al_2O_3	乙酸-水	410	528		
	$K_3[Fe(CN)_6]$(分离后)	LC	Amberlite IRC-50	硼酸-水	465	520		(0.05～10)ng
生物胺	$K_3[Fe(CN)_6]$(分离后)	HPLC	Partisil	甲醇-水-乙酸			≈0.5ng	
生物胺	$K_3[Fe(CN)_6]$+乙二胺(分离后)	TLC	硅胶 60	丙酮-氯仿-甲醇-乙酸	405	495	≈1ng	
肾上腺素等	$K_3[Fe(CN)_6]$+乙二胺(分离后)	LC	Al_2O_3	$HClO_4$-水	405	515		(10～5000)ng
	$K_3[Fe(CN)_6]$+乙二胺(分离后)	LC	Amberlite CG-50	磷酸缓冲液·H_3BO_3-水	410	500	<10ng	
ЛОФА 等	$K_3[Fe(CN)_6]$(分离后)	LC	Dowex 500W	HCl-水	400	480	<30 ng·ml^{-1}	
前列腺素	次氯酸叔丁酯(分离后)	TLC	硅胶+$(NH_4)_2SO_4$	苯-二噁烷-乙酸	365	580	<1μg	
寿比南(降血压药)	$V_2O_5+H_3PO_4$(分离前)	HPLC	μ-Bondapak C_{18}	甲醇-己烷-磺酸钠-水	390	470		(0.2～2)ng·ml^{-1}
不饱和酸	自动氧化(分离后)	TLC	硅胶 60	己烷-乙醚-乙醇-丁醇	340～360	390～390		
吡哆醛	$NaBH_3CN$(分离前)	TLC	硅胶	氯仿-甲醇	354	425		(0.1～2)ng·ml^{-1}
维生素K等	$NaBH_3CN$(分离后)	HPLC	Nucleosil C_{13}	甲醇-乙醇			≈1ng	
黄曲霉素 B_1, B_2, G_1, G_2	$NaBH_4$(分离前)	TLC	硅胶	氯仿-乙酸乙酯			≈0.4ng	
硝基联苯二酸	$SnCl_2$+HCl(分离后)	TLC	Силуфол	二噁烷-25%氨				
雌二醇	H_2SO_4(分理后)	TLC	硅胶	苯-甲乙酮		540		
Гестагены	H_2SO_4(分离后)	TLC	Силуфол	苯-乙酸乙酯(第一向)氯仿-乙醇(第二向)				
皮质类甾醇	H_2SO_4(分理后)	LC	硅胶	乙醇-氯仿				
安定(安眠药)	H_2SO_4(分理后)	TLC	硅胶	氯仿-甲醇-25%氨	390	439		(40～300)ng·ml^{-1}

表 23-14 某些有机化合物的荧光分析[1]

被测定组分	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度	应用	文献
维生素 A	340/480	(0～300)IU·ml^{-1}	—	橙汁鱼油	6
	340/480	(0.5～8)μg·ml^{-1}	—	饲料、食品	7
	紫外光/510	—	0.1μg·ml^{-1}		5
	345/490		—	血液	5
	340/490	(0～2.0)μg	—	动物组织	5
维生素 A 酯	323/475	(0.003～6)μmol·L^{-1}	—		5
维生素 A 醇	325/470	(0.003～6)μmol·L^{-1}	—		5
维生素 B_1	360/420,450	(0～2.0)μg·ml^{-1}	—	食品	8

续表

被测定组分	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度	应用	文献
维生素 B_1	370/452	$(0\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$		复方维生素制剂	9
	375/433	$(5.0\times10^{-7}\sim2.0\times10^{-5})mol\cdot L^{-1}$	$5.0\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	食物，药物	10
	360/420	$(3\times10^{-7}\sim1\times10^{-5})mol\cdot L^{-1}$	$3\times10^{-7}mol\cdot L^{-1}$	维生素 B_1 片剂	11
	同步荧光法	$(0\sim1.4)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	复合维生素 B 片	12
	同步荧光法	$(0.5\sim5.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.5\mu g\cdot ml^{-1}$	合成样品	13
	同步荧光法	$(0\sim0.8)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人体汗液	14
	导数-同步荧光法	$(0\sim1.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.5ng\cdot ml^{-1}$	复合维生素片剂	15
	370/440	$(0\sim1.4)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.60ng\cdot ml^{-1}$	人工合成样	16
	400/460	$(2.5\times10^{-7}\sim2.5\times10^{-5})mol\cdot L^{-1}$	—	生物样品，粮食，药物	17
	365/444	$(2\times10^{-8}\sim1\times10^{-4})mol\cdot L^{-1}$			5
维生素 B_2	335/520	$(0\sim1.20)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.22ng\cdot ml^{-1}$	人工混合样品	139
	同步荧光法	$(0\sim1.6)\mu g\cdot ml^{-1}$		合成样，复合维生素 B 片	12
	468/529	$(0\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$		复方维生素制剂	9
	同步荧光法	$(0.5\sim6.0)\mu g\cdot ml^{-1}$		合成样品	13
	同步荧光法	$(0\sim0.8)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人体汗液	14
	导数-同步荧光法	$(0\sim1.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$1.5ng\cdot ml^{-1}$	复合维生素片剂	15
	468/518		—	果蔬	18
	270/518.4	$(0.1\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	维酶素	19
	400/530	$(0\sim0.83)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	食品	20
	400/510	—		乳制品	21
	可变角同步荧光法	$(0.05\sim1.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.05\mu g\cdot ml^{-1}$	合成样	22
维生素 B_6	可变角同步荧光法	$(0.1\sim2)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.1\mu g\cdot ml^{-1}$	合成样	22
	292/382	$(0.357\sim3)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	食品	23
	导数-同步荧光法	$(0\sim1.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$4.0ng\cdot ml^{-1}$	复合维生素片剂	15
	326/330-400	$(0\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	复方维生素制剂	9
	同步荧光法	$(0\sim2.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	复合维生素 B 片	12
	310/372	$(0\sim2.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$1.0ng\cdot ml^{-1}$	合成样	16
	290/360	$(5\times10^{-5}\sim8\times10^{-5})mol\cdot L^{-1}$	—	生物样品	24
维生素 C	350/430	$(0\sim100)\mu g\cdot ml^{-1}$		蔬菜、水果	18
	554/580	$(0\sim4.0\times10^{-7})mol\cdot L^{-1}$	$4.0\times10^{-9}mol\cdot L^{-1}$	药物，水果，蔬菜	25
	350/425	$(0\sim5.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	蔬菜，干鲜水果，饮料	26
	350/430	$(0.25\sim1.43)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	药物，蕃茄，猕猴桃酒	27
	350/427	—	—	尿	28
	354/423	$(0\sim2.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$15ng\cdot ml^{-1}$	蔬菜，水果	29
	347/430	$(0\sim5.7)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	食品	30
维生素 D	425/475	$(0\sim50)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	生物液	5
维生素 E	295/340	$(0.5\sim8)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	食品，饲料	7
	265/325	$(0.1\sim20)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	茶叶	31
	同步荧光法	$(0.02\sim6.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$7ng\cdot ml^{-1}$	维生素 E 胶丸	32
	297/324	$(0\sim5.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.1\mu g\cdot ml^{-1}$	食品	33
	295/340	$(0.05\sim10)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	粮食，食品，饲料，蔬菜	34
	295/325	$(0.5\sim100)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	肝组织，血清	35
	295/325	$(0\sim100)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	食品	36
	295/325	—	$50ng\cdot ml^{-1}$	血液，动物组织	5
	295/340	$(0.6\sim40)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	血清	5
维生素 K_1	紫外光/431	$(5\sim130)ng\cdot ml^{-1}$	—		37
苯并(a)芘	365/400	—		啤酒，饮料，酱油，醋	38
	389/413	$(0.005\sim10)ng\cdot ml^{-1}$	$0.003ng\cdot ml^{-1}$	合成样	39

续表

被测定组分		$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线 性 范 围	灵敏度	应 用	文献
苯并(a)芘		367/405	(0～10)ng	0.018ng	大气飘尘	40
		同步荧光法	—	—	飘尘	41
		同步荧光法	(0.1～15.0)ng·ml^{-1}	0.0093ng·ml^{-1}	水样	42
3,4-苯并芘		367/407	(0.04～4)ng·ml^{-1}	0.02ng·ml^{-1}	赖氨酸及其制剂	56
1-羟基芘		同步荧光法 ($\Delta\lambda$=35nm)	(0.5～500)ng·ml^{-1}	0.05ng·ml^{-1}	尿	43
蒽、苝	蒽	磁场效应-偏振-共振同步荧光法	(2～18)ng·ml^{-1}	0.068ng·ml^{-1}	合成样	44
			(0.5～4.5)ng·ml^{-1}	0.015ng·ml^{-1}		
䓛、蒽、苝	䓛	偏振-同步荧光法	(0～20.0)μg·ml^{-1}	170ng·ml^{-1}	人工混合样品	45
	蒽		(0～0.2)μg·ml^{-1}	1.8ng·ml^{-1}		
	苝		(0～10)ng·ml^{-1}	0.26ng·ml^{-1}		
	䓛	磁效应-偏振-共振同步荧光法	(0.20～10.0)μg·ml^{-1}	12.9ng·ml^{-1}	人工混合样品	46
	蒽		(2.0～60.0)ng·ml^{-1}	0.074ng·ml^{-1}		
	苝		(0.20～10.0)ng·ml^{-1}	0.0039ng·ml^{-1}		
咔唑、蒽、苝	咔唑	恒能量同步荧光法 ($\Delta\bar{\nu}$=1600cm^{-1})	(0～2.0)μg·ml^{-1}	1ng·ml^{-1}	人工混合样品	47
	蒽		(0～1.0)μg·ml^{-1}	0.8ng·ml^{-1}		
	苝		(0～1.0)μg·ml^{-1}	0.5ng·ml^{-1}		
芘、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘	芘	320/400	—	0.77ng	尿	48
	BkF	300/450		0.05ng		
	BaP	294/410	—	0.06ng		
	芘	同步荧光法	(0～170)ng·ml^{-1}	—	尿	49
	BkF		(0～30)ng·ml^{-1}	—		
	BaP		(0～44)ng·ml^{-1}	—		
萘、芘、苝	萘	三维荧光光谱总体积积分法	$F=12282C^{1.19}$	$S/N=5.7\times10^{3}$	人工混合样品	50
	芘		$F=1771C^{2.90}$	$S/N=1.2\times10^{4}$		
	苝		$F=9056C^{1.90}$	$S/N=9.7\times10^{3}$		
芴、萘、菲、芘	芴	三维偏最小二乘法	(0～100)ng·ml^{-1}	—	人工混合样品	51
	萘		(0～80)ng·ml^{-1}	—		
	菲		(0～100)ng·ml^{-1}			
	芘		(0～21)ng·ml^{-1}	—		
		广义减秩-荧光法		—	人工混合样品	52
芴、苊、蒽、苝	芴	偏振-同步荧光法	(0～100.0)ng·ml^{-1}	1.1ng·ml^{-1}	人工混合样品	53
	苊		(0～520.0)ng·ml^{-1}	10.0ng·ml^{-1}		
	蒽		(0～100.0)ng·ml^{-1}	1.8ng·ml^{-1}		
	苝		(0～20.0)ng·ml^{-1}	0.26ng·ml^{-1}		
䓛,苯并[a]蒽,苯并[k]荧蒽,苝	䓛	同步荧光-高效液相色谱法	(0～72.2)ng·ml^{-1}	0.258ng·ml^{-1}	海洋沉积物	54
	BaA		(0～57.6)ng·ml^{-1}	0.206ng·ml^{-1}		
	BkF		(0～67.5)ng·ml^{-1}	0.225ng·ml^{-1}		
	苝		(0～11.7)ng·ml^{-1}	0.039ng·ml^{-1}		
蒽、1,2-苯并芘、3,4 苯并芘、芘、1,2,5,6-二苯并蒽	蒽	时间分辨荧光法	$(3\times10^{-4}～9\times10^{-4})$mol·L^{-1}		人工混合样品,药物生化体系	55
	BEP		—	—		
	BAP		—	—		
	芘		—	—		
	DBAN			—		
多环芳烃		三维全扫描荧光法	—	—	油田单井评价	57
苯酚、间苯二酚		双体系双波长荧光法	(0.05～10.0)μg·ml^{-1}	50ng·ml^{-1}	复方雷琐辛涂剂	143
		同步荧光-多波长数据线性回归法	—		复方雷琐辛涂剂	144
		褶合曲线分析法用于同步荧光光谱法			人工合成样品	145
酚		269/298	(3～100)ng·ml^{-1}	3ng·ml^{-1}	天然水	2
		265/323	(5～250)μg·L^{-1}	1.0ng·ml^{-1}	天然水	2
		274/372	(10～200)ng·ml^{-1}	3.0ng·ml^{-1}	水,废水	59
		310/410	(2～1000)pmol	0.16pmol	饮用水	60
1-萘酚、2-萘酚	1-萘酚	导数-可变角同步荧光法	(0～2)μg·ml^{-1}	6.7ng·ml^{-1}	人工混合样品	61
	2-萘酚		(0～0.5)μg·ml^{-1}	3.6ng·ml^{-1}		

续表

被测定组分		$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度	应用	文献
萘、1-萘酚、2-萘酚	萘	拟面积多波长数据线性双组合解析同步荧光光谱	$(0\sim0.1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人工混合样品	62
	1-萘酚		$(0\sim0.2)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		
	2-萘酚		$(0\sim0.1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—		
叶绿素a、叶绿素b	chla	二阶导数荧光法	$(4\sim400)ng\cdot ml^{-1}$	—	菜叶	63
	chlb		$(1\sim300)ng\cdot ml^{-1}$	—		
	chla	同步荧光法	$(0.5\sim200)ng\cdot ml^{-1}$	$0.4ng\cdot ml^{-1}$	菜叶	64
	chlb		$(0.5\sim150)ng\cdot ml^{-1}$			
罗丹明B、罗丹明6G		同步荧光法	$(0\sim0.1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人工混合样品	65
荧光黄，罗丹明B，罗丹明6G		同步荧光法	$(0.01\sim0.20)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人工混合样品	66
		卡尔曼滤波荧光法	$(0\sim0.16)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人工混合样品	67
阳离子表面活性剂	TPB	522/540	$(0\sim0.12)\mu g\cdot ml^{-1}$	$12.0ng\cdot ml^{-1}$	合成样	68
	CPC		$(0\sim0.10)\mu g\cdot ml^{-1}$	$6.6ng\cdot ml^{-1}$		
	CPB			$8.4ng\cdot ml^{-1}$		
	CTMAB			$9.2ng\cdot ml^{-1}$		
	Zeph			$8.0ng\cdot ml^{-1}$		
混合色素	AM	334/430	$(0\sim220)ng\cdot ml^{-1}$	$0.64ng\cdot ml^{-1}$	人工合成样品	69
	DY	355/425	$(0\sim120)ng\cdot ml^{-1}$	$0.045ng\cdot ml^{-1}$		
CTMAB		400/460	$(2\times10^{-7}\sim1.2\times10^{-5})mol\cdot L^{-1}$	$1.8\times10^{-8}mol\cdot L^{-1}$	废水	70
溶菌酶		496/516	$(1\sim5)\mu g$	—	溶菌酶原料，口含片、肠溶片	71
己糖激酶		紫外光下暗室中观察荧光	—	—	血	72
β-葡萄糖苷酶		358/448	$(5\sim80)\mu l$	—	正常人流绒毛	73
β-葡萄糖醛酸苷酶		荧光照相	—	—	胆汁	74
β-葡萄糖苷酸酶		365/455	—	—	植物提取液	75
肌酸磷酸激酶		405/485	$(0.1\sim0.4)\mu mol\cdot L^{-1}$	—	血清	76
		400/515	$(0\sim0.04)mmol\cdot L^{-1}$	—	血清	79
酪氨酸羟化酶		350/475	2pmol～2nmol	—	鼠脑和肾上腺髓质	78
醛糖还原酶		367/455	$(10\sim40)\mu l$	—	大鼠晶体	77
脱氧核糖核酸酶		520/550-650	—	—	真核与原核细胞	80
β-N-乙酰氨基己糖苷酶		360/450	$(0\sim100)U\cdot L^{-1}$		血清	4
碱性磷酸酶		361.6/465	$(0\sim13)U\cdot L^{-1}$	—	血清	81
碱性磷酸酯酶		490/513	$(10^{-9}\sim10^{-4})U\cdot ml^{-1}$	$1.4\times10^{-9}U\cdot ml^{-1}$	合成样	82
酸性磷酸酯酶		490/513	$(10^{-4}\sim1)U\cdot ml^{-1}$	$3.6\times10^{-4}U\cdot ml^{-1}$	合成样	82
ATP		365/460	$(0\sim5)\mu g$	—	兔骨骼肌	83
酶反应底物	HPA	250/	$(500\sim1\times10^4)ng\cdot ml^{-1}$	3.63	合成样	84
			$(10\sim900)ng\cdot ml^{-1}$			
	HPPA		$(500\sim1\times10^4)ng\cdot ml^{-1}$	4.79		
			$(10\sim900)ng\cdot ml^{-1}$			
	MPA		$(500\sim1\times10^4)ng\cdot ml^{-1}$	4.36		
			$(5\sim900)ng\cdot ml^{-1}$			
	HVA		$(500\sim0.9\times10^4)ng\cdot ml^{-1}$	2.35		
			$(10\sim900)ng\cdot ml^{-1}$			
	PR		$(500\sim1\times10^4)ng\cdot ml^{-1}$	5.04		
			$(10\sim900)ng\cdot ml^{-1}$			
色氨酸		303/350	$(0\sim0.77)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	粮食	4
		285/355	$(0.1\sim0.7)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	氨基酸-山梨醇注射液	85
		280/368	$(0.1\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.5ng\cdot ml^{-1}$	食品，饲料	86
		285/365	$(0\sim50)\mu mol\cdot L^{-1}$	—	血清，血浆	87
		302/448	—	—	血清超滤液	88
		320/392	$(0.2\sim1.6)\mu g\cdot ml^{-1}$	$10ng\cdot ml^{-1}$	蛋白质	89
酪氨酸		319/406	$(1.0\sim2.0)\mu g\cdot ml^{-1}$		人血清	3
		500/550	$(0\sim0.1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	血清	90

续表

被测定组分	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度	应用	文献
酪氨酸	316/412	$(0\sim2)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人血清	91
	303/350	$(0.12\sim1.44)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	血清	92
色氨酸、酪氨酸	卡尔曼滤波荧光分析法	—		豆粉	93
Trp	导数荧光法	$(0\sim2.8)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人工混合样品	94
Tyr		$(0\sim4)\mu g\cdot ml^{-1}$			
苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸 Phe	同步荧光分析	$(0.07\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	氨基酸注射液，水解蛋白注射液	4
Tyr		$(0.02\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$			
Trp		$(0.001\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$			
Phe	同步扫描-导数荧光法	$(0\sim8)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	饮料	95
Tyr		$(0.1\sim2.4)\mu g\cdot ml^{-1}$			
Trp		$(0.01\sim0.2)\mu g\cdot ml^{-1}$			
Phe	卡尔曼滤波荧光光度法	$(0.07\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	合成样品	96
Tyr		$(0.01\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$			
Trp		$(0.01\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$			
Phe	同步荧光法	$(0.07\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	人工混合样品	97
Tyr		$(0.02\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$			
Trp		$(0.001\sim0.5)\mu g\cdot ml^{-1}$			
赖氨酸	380/468	$(0\sim1.92)\mu g\cdot ml^{-1}$	$5ng\cdot ml^{-1}$	食品，蔬菜	2
氨基酸	362/454	$(10^{-6}\sim10^{-7})mol\cdot L^{-1}$	—	合成样	98
	350/515	$(0\sim4\times10^{-6})mol\cdot L^{-1}$	$5\times10^{-11}mol$	血浆	99
人体转铁蛋白	433/525	$(0\sim500)mg\cdot L^{-1}$	—	人血清	100
γ-球蛋白	340/455	$(0.04\sim2)mg\cdot ml^{-1}$	—	蛋白质	101
人血清白蛋白	370/470	$(1\sim5)\mu g$	—	蛋白质	102
	308/423	$(0.5\sim12)\mu g\cdot ml^{-1}$	$0.5\mu g\cdot ml^{-1}$	人血清	103
丹磺酰肽	荧光比色法	$(10^{-13}\sim10^{-7})mol$	0.1pmol		104
	荧光薄层扫描	$(10^{-11}\sim10^{-9})mol$	10pmol	兔脑脊液	
还原型谷胱甘肽	345/425	$(5\times10^{-3}\sim5)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	血小板	105
	350/430	$(2\sim10)\mu g$	—	肺组织	106
氧化型谷胱甘肽	350/430	$(2\sim10)\mu g$	—		106
癌胚抗原	TRFIA	$(0\sim500)ng\cdot ml^{-1}$	$0.2ng\cdot ml^{-1}$	血清	107
脱落酸	373/490	$(0\sim0.1)\mu g\cdot ml^{-1}$	$2ng\cdot ml^{-1}$	合成样	3
肌酸	395/495	$(0\sim2287.8)\mu mol\cdot L^{-1}$	—	红细胞，血清	108
DNA	525/580	$(0\sim30)\mu g$	—	肿瘤细胞	109
	408/498	$(48\sim1280)ng$	—	细胞	110
	488/	—	—	淋巴细胞	111
	—	—	—	骨髓	112
	520/590	$(1\sim4)\mu g\cdot ml^{-1}$	$25ng\cdot ml^{-1}$	骨髓	113
	356/450	$(0.05\sim1.0)\mu g\cdot ml^{-1}$		细胞裂解液	114
	292/492	$(0.5\sim20.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$20ng\cdot ml^{-1}$	小牛胸腺，鱼精子	115
RNA	288/494,545	$(0.1\sim10)\mu g\cdot ml^{-1}$	$6.0\times10^{-8}mol\cdot L^{-1}$	牛肝脏组织	116
	520/590	$(1\sim4)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	骨髓	113
	292/492	$(0.5\sim20.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	合成样	115
黄曲霉毒素 B_1	365/425	$(0.9\sim72)ng$	0.9ng	食品	2
	360/415	$(0\sim100)ng$	0.3ng	花生，玉米	117
山黧黑毒素	470/530	$(0.01\sim1)\mu g\cdot ml^{-1}$	—	山黧豆	3
过氧化脂质	515/550	$(0\sim20)\mu mol\cdot L^{-1}$	$0.16\mu mol\cdot L^{-1}$	血清	118
	515/553	$(0\sim1.0)nmol\cdot L^{-1}$	—	血清	119
	526/553	$(10\sim200)\mu l$	—	血清	120
	515/553	$(0\sim220)ng\cdot ml^{-1}$	—	血清	121
	515/553	$(0\sim50)\mu l$	—	视网膜组织	122
细胞色素 C	同步荧光法	$(3\sim16)\mu mol\cdot L^{-1}$	—	蛋白质	123
血卟啉衍生物	405/598	$(0\sim250)ng\cdot ml^{-1}$	$0.01\mu g$	生物组织	124
	390/630	$(0\sim8)ng$	—	微量全血分析	140
	546/620	—	—	光敏治癌药 HPD 制剂	141
葡萄糖	316/424	$(1.5\sim5.0)\mu g\cdot ml^{-1}$	$1.5\mu g\cdot ml^{-1}$	人血清	125

续表

被测定组分	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度	应用	文献
葡萄糖	318/424	(0.5～8.0)μg·ml^{-1}		人血清	126
	297.6/414.4	(0.17～16.7)μg·ml^{-1}	0.15μg·ml^{-1}	合成样	127
	317.5/423	(0～8.0)μg·ml^{-1}	0.2μg·ml^{-1}	血清	128
	316.5/436	(0.20～4.0)μg·ml^{-1}	—	血清	129
甲状腺素(T_4)、三碘甲腺原氨酸(T_3)	TRFIA	(2～32)μg·dl^{-1}	0.5μg·dl^{-1}	血清	4
		(50～800)ng·dl^{-1}	25ng·dl^{-1}		
肾上腺素(E)、去甲肾上腺素(NE)	同步扫描等强度荧光光度法	(5～200)ng·ml^{-1}	1ng·ml^{-1}	尿	130
NE	410/500	(0～16)ng·ml^{-1}	25pg·ml^{-1}	血浆	131
E	455/500				
	—	—	0.5ng		2
5-羟色胺		(25～200)ng·ml^{-1}	—	血小板,血浆	132
	356/480	(100～500)ng·ml^{-1}		血小板	133
		(1～5)μg·ml^{-1}			
	350/475	(5～300)ng·ml^{-1}	—	血小板	134
季铵盐	420/505	—	1.96×10^{-6}mol·L^{-1}	自来水,洁尔灭	135
苯酚,苯胺	可变角同步荧光法	—	0.0087μg·ml^{-1}	人工合成样品	4
			0.030μg·ml^{-1}		
苯胺、二苯胺、*N*-甲基苯胺	三维荧光法	(2.0×10^{-7}～5.0×10^{-6})mol·L^{-1}	1.0×10^{-7}mol·L^{-1}	混合样品,工业废水	136
		(9.0×10^{-8}～7.4×10^{-6})mol·L^{-1}	8.0×10^{-9}mol·L^{-1}		
		(1.3×10^{-7}～2.0×10^{-6})mol·L^{-1}	1.0×10^{-7}mol·L^{-1}		
多胺	337/495	(0～3)nmol·L^{-1}	10^{-3}nmol·L^{-1}	植物	137
伯胺	425/495	—	0.042μmol·L^{-1}	茶叶,啤酒,药物	138
	345/455	—	0.20μmol·L^{-1}		
叔胺	383/446	(10^{-8}～10^{-7})mol·L^{-1}	1ng·ml^{-1}	药物	142
油分 0号柴油	恒能量差同步荧光分析 $\Delta\nu$=800cm^{-1}	(0.05～40)μg·ml^{-1}	—	某港避风坞淤泥及海水	58
机油		(0.1～80)μg·ml^{-1}			
液压油		(0.1～100)μg·ml^{-1}			
重油		(0.05～80)μg·ml^{-1}			
次黄嘌呤、黄嘌呤	330/420	(0～2)μg·ml^{-1}	—	鱼	2
槲皮素	423.1/501.3	(0.30×10^{-6}～1.00×10^{-5})mol·L^{-1}	3.79×10^{-7}mol·L^{-1}	药物	4
胺乙基硫代磷酸酯	360/470	(0～1.0)μg·ml^{-1}	10ng·ml^{-1}	农药杀虫剂	2
$\Delta^{1,4}$-3-酮类甾体化合物	338/392	(0～16)μg		发酵液	2
脱氢乙酸	325/372.8	(0～0.5)μg·ml^{-1}	—	人造黄油	3
炔雌醇	237/308	(0～3.0)μg·ml^{-1}	—	复方甲基炔诺酮	3
	288/307	(0～4)μg·ml^{-1}	—	复方炔诺酮片	146
	468/490	(0～3.15)μg·ml^{-1}		复方乙酸甲地孕酮片	147
雌三醇	285/610	(1.25～40.00)μg·ml^{-1}	0.52μg·ml^{-1}	尿	148
	285/315	(0～50)μg·ml^{-1}	—	尿	149
戊酸雌二醇	285/306	(0.1～15)μg·ml^{-1}	—	戊酸雌二醇油注射液	150
苯甲酸	同步荧光法	(0.20～10.00)μg·ml^{-1}	—	饮料	151
水杨酸	340/450	(0～6.00)μg·ml^{-1}	—	复方乙酰水杨酸片,乙酰水杨酸片	152
苯甲酸,水杨酸	导数-同步荧光法	(1.0～20.0)μg·ml^{-1}	26ng·ml^{-1}	商品杀菌防腐剂	153
			83ng·ml^{-1}		
苦味酸	363/448	(1×10^{-4}～1×10^{-6})mol·L^{-1}	8×10^{-7}mol·L^{-1}	药品奎宁,水样	154
阿魏酸	352/467	(0.25～2.25)μg·ml^{-1}	—	血药浓度	155

续表

被测定组分	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度	应用	文献
吡哌酸	固体表面—延迟荧光法	(1.8～1800)ng/斑点	1.8ng/斑点	药片	156
	327/446	(1～16)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	吡哌酸原料及药片	4
哌啶酸	360/495	(0.04～2)nmol	2.0pmol	人血浆	157
萘啶酸	257/362	(8.6～460)$ng \cdot ml^{-1}$	8.6$ng \cdot ml^{-1}$	尿液	158
酸性药物	542/566		10-50$ng \cdot ml^{-1}$	酸性药物	159
哌唑嗪	248/388	(2～200)$ng \cdot ml^{-1}$	1$ng \cdot ml^{-1}$	血浆	160
甲萘醌	335/425	(0～2.70)$\mu g \cdot ml^{-1}$	2.6$ng \cdot ml^{-1}$	人工混合样品	139
	335/430	(0～9.60)$\mu g \cdot ml^{-1}$	2.5$ng \cdot ml^{-1}$	维生素 K_3 注射液	161
敌敌畏	491.6/521.1	(0～1.0)$\mu g \cdot ml^{-1}$	22$ng \cdot ml^{-1}$	空气	162
	—	—	400$ng \cdot ml^{-1}$		2
	—		100$ng \cdot ml^{-1}$		2
诺氟沙星	276/447	(0.05～0.5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	10$ng \cdot ml^{-1}$	尿	163
	327/450	(0.08～1.6)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	兔血浆，诺氟沙星胶囊	164
氧氟沙星	294/495	(20～800)$\mu g \cdot ml^{-1}$	10$\mu g \cdot ml^{-1}$	尿	165
甲磺酸培氟沙星	280/445	(0.16～0.5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	甲磺酸培氟沙星片	4
头孢氨苄	345/432	(0.1～4.0)$\mu g \cdot ml^{-1}$	10$ng \cdot ml^{-1}$	尿	4
	348/444	(0～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	原料药，胶囊剂	166
	338/420	(0.50～100)$ng \cdot ml^{-1}$	0.24$ng \cdot ml^{-1}$	血清，尿	167
	341/436	(2.0～70)$ng \cdot ml^{-1}$	—		
氨苄青霉素	360/400	(0～10)$\mu g \cdot ml^{-1}$	16$ng \cdot ml^{-1}$	血液	168
庆大霉素	免疫荧光偏振法		—	血	169
	—	—	0.3	人血清	3
强力霉素	365/490	$(9.0\times10^{-9}\sim1.0\times10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	$3.6\times10^{-9}mol \cdot L^{-1}$	尿，血清	170
	336/405	$(3.0\times10^{-8}\sim4.0\times10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	$1\times10^{-8}mol \cdot L^{-1}$	体液	171
金霉素	365/418	$(10^{-8}\sim10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	$6.0\times10^{-9}mol \cdot L^{-1}$	金霉素产品，四环素产品，尿，血清	172
	336/405	$(4.0\times10^{-9}\sim3.0\times10^{-7})mol \cdot L^{-1}$	$3\times10^{-9}mol \cdot L^{-1}$	体液	171
土霉素	415/505	(0～15)$\mu g \cdot ml^{-1}$		尿	2
	336/405	$(8.0\times10^{-9}\sim6.0\times10^{-7})mol \cdot L^{-1}$	$4\times10^{-9}mol \cdot L^{-1}$	体液	171
四环素	405/530			血浆	173
	400/510	$(0\sim10^{-2})\mu g \cdot ml^{-1}$	1$ng \cdot ml^{-1}$	片剂，膏剂	4
	336/405	$(9.0\times10^{-9}\sim7.0\times10^{-7})mol \cdot L^{-1}$	$4\times10^{-9}mol \cdot L^{-1}$	体液	171
差向四环素	365/492	(0.04～0.12)$\mu g \cdot \mu l^{-1}$		四环素	174
四环素，脱水四环素	同步荧光法	$(1.0\times10^{-8}\sim3.0\times10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	$4.0\times10^{-9}mol \cdot L^{-1}$	尿，人工混合样	4
		$(8.0\times10^{-9}\sim2.2\times10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	$2.0\times10^{-9}mol \cdot L^{-1}$		
	333.1/416	$(8.0\times10^{-9}\sim1.0\times10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	—	血清，尿	175
	440.2/520	$(0\sim2.0\times10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	—		
阿霉素	—	—	—	针剂	4
赤霉素	360/475	(20～164)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	药物	3
丁胺卡那霉素	392/483	—	—	药剂	3
硫酸奎尼丁	353/443	(0.01～0.05)$\mu g \cdot ml^{-1}$	5$ng \cdot ml^{-1}$	血清	2
	—	—	2.5$ng \cdot ml^{-1}$		2
	355/445	(0.2～2.0)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	血清	176
利凡诺	365/荧光比色	(0～5)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	人血白蛋白注射液	3
	273/400	(1～150)ng	0.2ng	人血白蛋白制品，兔血	4
盐酸苯海拉明	—	$(1.4\times10^{-7}\sim8.2\times10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	$9\times10^{-8}mol \cdot L^{-1}$	药物	177
甲氨喋呤	368/505	(0～0.200)$mg \cdot ml^{-1}$	0.5$\mu g \cdot ml^{-1}$	多相脂质体	2
	380/456	(0～80)$ng \cdot ml^{-1}$	15$ng \cdot ml^{-1}$	血浆	178
	—	(0～16)$\mu g \cdot ml^{-1}$	0.5$\mu g \cdot ml^{-1}$	尿	
萘普生	274/356	(0.01～3.0)$\mu g \cdot ml^{-1}$	—	片剂	179

续表

被测定组分	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	线性范围	灵敏度	应用	文献
茶碱	325/400	(2.5～20)μg·ml^{-1}	0.1μg·ml^{-1}	血清	180
消炎痛	296/385	(0～0.05)μg·ml^{-1}	—	血清	181
多菌灵	280/398	(0.025～2.0)μg·ml^{-1}	—	粉剂	182
酒石酸美托洛尔	275/600	(0.010～50)μg·ml^{-1}	0.42ng·ml^{-1}	片剂	183
秦皮甲素	360/420	(0.02～8)μg·ml^{-1}	0.378ng·ml^{-1}	秦皮	184
秦皮乙素	360/470	(0.002～8)μg·ml^{-1}	0.0554ng·ml^{-1}	秦皮	184
青蒿琥酯	350/450	(2～10)μg·ml^{-1}	1μg	抗疟药	185
9-对甲苯胺基吖啶	417/517	(0～2.0)μg·ml^{-1}	—	片剂	186
安定	368/476	(0～2.5)μg·ml^{-1}	44ng·ml^{-1}	片剂、注射液	187
胺碘酮	400/510	(10^{-9}～10^{-5})mol·L^{-1}	—	胶囊，片剂	188
氯氮䓬(利眠宁)	265,370/442	(0～3.00)μg·ml^{-1}	16ng·ml^{-1}	片剂	4
龙胆苦甙	360/470	(0.01～0.1)μmol·L^{-1}	58.8nmol·L^{-1}	秦艽，兔血	189
梭曼	400/472	(0.01～0.18)μg·ml^{-1}	10ng·ml^{-1}	合成样	190
6β-乙酰氧基去甲莨菪烷	355/500	(0～80)μg·ml^{-1}	—	眼药水	191
丹皮酚	275/550	(0.02～800)ng·ml^{-1}	5.7pg·ml^{-1}	兔血浆	4
心得安	296/340	(0.04～0.20)μg·ml^{-1}	5ng·ml^{-1}	血浆	3
氨酰心安	222.3/297.4 222.3/297.4	(0～3.00)μg·ml^{-1} (0～5.75)μg·ml^{-1}	16.9ng·ml^{-1} 86ng·ml^{-1}	片剂 片剂	4 192
磺胺嘧啶	315/401	(0.02～3.2)μg·ml^{-1}	20ng·ml^{-1}	片剂	193
磺胺甲基异噁唑 甲氧苄氨嘧啶	同步荧光法	(0.125～4.00)μg·ml^{-1} (0.125～3.00)μg·ml^{-1}	—	复方新诺明	194
吡喹酮	346/460	(0～1)μg·ml^{-1}	5.3ng·ml^{-1}	兔血浆	2
利血平	385/490 400/464	(0.01～0.30)μg·ml^{-1} (0～0.6)μg·ml^{-1}	1.3ng·ml^{-1} 0.2ng·ml^{-1}	片剂及注射液 尿	4 195
止血敏	300nm 薄层扫描	(0～10)μg	—	原料粉及注射液	2
小檗碱	366nm 薄层扫描	(0.4～3.2)μg	—	黄连及其制剂	198
乌头碱	282/317	(0.02～10)μg·ml^{-1}	—	雪山一枝蒿	197
唐松草新碱	235/318	(0～1)μg·ml^{-1}	—	注射液	3
脱氢紫堇碱盐酸盐	350/516	(0.2～1.0)μg·ml^{-1}	—	片剂	2
丹参素	285/317	(0.1～0.6)μg·ml^{-1}	—	丹参制剂	2
包公藤甲素	350/500	(1～4)nmol·ml^{-1}	—	缩瞳药物	196
延胡索乙素	282/(300～330)	(0～1.2)μg·μl^{-1}	43.4ng·ml^{-1}	原料药，片剂	199
磷酸氯喹 磷酸伯氨喹	同步荧光法	(1～8)μg·ml^{-1} (10～110)μg·ml^{-1}	—	复方止疟片	200
喜树生物碱衍生物	三维同步荧光法	—	—	天然喜树籽	201
硫酸阿托品	210nm 薄层扫描	(0～5)μg	—	片剂、注射液	202
蛇床子素 欧前胡素	365nm 薄层扫描	(0～8)μg	—	蛇床子	1
β-甲基地高辛	356/486	(0～0.4)μg·ml^{-1}	—	片剂	2
盐酸萘唑啉	280/327	(100～500)ng·ml^{-1}	—	淚泪净滴眼剂	3
苦杏仁甙		(4～20)ng·ml^{-1}	—	苦杏仁	3
芥子碱	313/扫描	—	—	莱服子	3
芦丁	325/420	(1×10^{-6}～1×10^{-5})mol·L^{-1}	—	复方降糖粉	3
柳珊瑚酸	—	—	ng·ml^{-1}级	药物	3
对乙酰氨基酚	350/400	(2.5～4.5)μg·ml^{-1}	—	速效感冒片	3
蒙肌胞	526/600	(2～12)μg·ml^{-1}	—	消炎药物	3

本表参考文献：

1 孙文基，沙振方等．药学学报，1990；25(7)：530

2 章竹君．分析试验室，1989；8(4)：35

3 章竹君，吕九如．分析试验室，1991；10(4)：102

4 刘长松，魏雁声等．分析试验室，1995；14(4)：86

5 陈国珍，黄贤智，许金钩等编．荧光分析法，第二版．北京：科学出版社，1990.
6 孟庆礼，白志龙．药物分析杂志，1985；5(4)：241
7 邵晓芬，郭或杨．光谱学与光谱分析，1993；13(3)：93
8 朱妙清，张旦民，万良才．食品科学，1985；62：43
9 高光恩，杨桂英．沈阳药学院学报，1992；9(1)：18
10 揭念琴，杨景和，张志刚．分析化学，1992；20(8)：984
11 杨 屹，蔡汝秀，黄厚评等．分析化学，1993；21(3)：360
12 弓晓峰，黄坚锋，倪永年．分析化学，1994；22(9)：935
13 许金钩，黄贤智等．医药工业，1985；16(11)：487
14 张 工，王 一，王晓辉等．工业卫生与职业病，1988；14(6)：364
15 唐 波，何锡文，沈含熙等．高等学校化学学报，1994；15(7)：970
16 郭祥群，许金钩等．分析化学，1992；20(8)：910
17 揭念琴，杨景和等．分析化学，1993；21(3)：333
18 邵晓芬，张韵慧．光谱学与光谱分析，1994；14(2)：125
19 邵建本，赵 晶，朱汉松等．中国药学杂志，1992；27(5)：279
20 张旦民，朱妙清，万良才．食品与发酵工业，1985；(3)：36
21 赵人琤，魏国勤．营养学报，1986；8(4)：366
22 李耀群，黄贤智等．分析化学，1991；19(5)：538
23 高海涛，陈晓光．分析化学，1990；18(4)：377
24 慈云祥，贾 欣．分析化学，1987；15(3)：254
25 冯宁川，徐伯兴，方禹之．分析测试学报，1993；12(4)：26
26 张旦民，张琦行．食品与发酵工业，1986；(6)：50
27 石继煎．食品与发酵工业，1986；(5)：20
28 彭恕生，张茂生．营养学报，1982；4(1)：75
29 刘列军，宛如琨．光谱学与光谱分析，1989；9(4)：78
30 李文奇．食品与发酵工业，1994；(1)：67
31 游联勤，吴国强，田笠卿等．南京医学院学报，1987；7(4)：304
32 王晋玲，许金钩．药物分析杂志，1993；13(2)：98
33 陈家华，严罗美．食品科学，1986；79；43
34 阚健全．分析测试通报，1991；10(3)：51
35 贺幼平，朱莲珍．营养学报，1984；6(1)：73
36 夏贤明，饶泽青．中国酿造，1986；(6)：37
37 J. J. Aaron et al. Appl. Spectrosc，1976；30：159
38 杨毓端，方 荣等．食品与发酵工业，1988；(2)：66
39 赵 祛，黄铁民等．分析化学，1995；23(1)：67
40 丁 力，王耐芬等．分析化学，1989；17(5)：463
41 雷世寰．分析化学，1987；15(2)：168
42 朱亚先，张 勇．分析测试学报，1996；15(1)：44
43 赵振华，田德海，全文熠．环境化学，1994；13(2)：141
44 张 勇，黄贤智等．分析化学，1994；22(5)：445
45 顾丽忠，黄承玲，翁毅滨等．光谱学与光谱分析，1993；13(3)：87
46 张 勇，黄贤智，许金钩等．分析测试学报，1995；14(3)：10
47 李耀群，黄贤智．分析化学，1990；18(9)：827
48 赵振华，全文熠等．环境化学，1988；7(3)：34
49 赵振华，全文熠．环境科学学报，1988；8(2)：242
50 耶 远，王乐天，林竹光等．高等学校化学学报，1995；16(10)：1519
51 张军廷，顾志澄，丛培盛等．分析化学，1991；19(12)：1379
52 从培盛，李通化，张军廷等．高等学校化学学报，1991；12(10)：1308
53 顾丽忠，翁毅滨，黄贤智等．高等学校化学学报，1992；13(10)：1214
54 曹学丽，胡学华，姚渭溪．分析化学，1994；22(7)：664
55 汤又文，王文韵．分析化学，1990；18(10)：962
56 沈德愉．药物分析杂志，1989；9(3)：136
57 侯镜德，路文初．分析测试学报，1995；14(4)：33
58 李耀群，黄贤智．光谱学与光谱分析，1993；13(6)：117
59 王志恒，张继华等．分析化学，1993；21(5)：581
60 郑明辉，徐宏达，傅承光．高等学校化学学报，1993；14(2)：197
61 李耀群，黄贤智，许金钩等．高等学校化学学报，1993；14(3)：334
62 唐 波，何锡文，沈含熙．环境化学，1996；15(1)：61
63 黄贤智，许金钩，蔡 挺．分析化学，1987；15(4)：293
64 黄贤智，许金钩，蔡 挺．高等学校化学学报，1987；8(5)：418
65 张晶玉等．光谱学与光谱分析，1994；14(4)：119
66 黄贤智，陈国强等．分析化学，1986；14(10)：761
67 李志良，石乐明，李梦龙等．高等学校化学学报，1990；11(3)：245
68 刘绍璞，刘忠芳，李康业．化学学报，1995；53：473
69 郭祥群，许金钩，陈国珍．高等学校化学学报，1992；13(4)：450
70 杨昌晖，杨志斌，张纯名．化学试剂，1994；16(5)：271
71 周有元．药物分析杂志，1988；8(6)：329
72 吴梓梁，余伟栋，汤沃湛等．中华血液学杂志，1989；10(9)：492
73 王建枝，何普述．生物化学杂志，1990；6(2)：102
74 宋立新，何普述．生物化学杂志，1990；6(6)：499
75 王 钧，李 洁等．实验生物学报，1990；23(2)：127
76 安 良，崔庆亮．中华医学检验杂志，1984；7(1)：5
77 周云平，张家庆．中华内分泌代谢杂志，1989；5(3)：159
78 Lee M et al. J Chromatogr (Biomed. Appl.)，1987；41(5)：289
79 张通哲，薛玉凤．天津医药，1983；11(5)：297
80 邱长春，吴冠芸，吴志奎．生物化学与生物物理进展，1984；57：79
81 吕 元，丁 庆，吕 晴．中华医学检验杂志，1993；16(4)：219
82 龚国权，王滨芳，周云高等．高等学校化学学报，1992；13(7)：913
83 侯淦泉，任志文，黄建明等．生物化学与生物物理进展，1986；(4)：74
84 王冬媛，许金钩等．分析测试学报，1995；14(4)：42
85 陈 一，郑玉聪．药学通报，1985；20(12)：720
86 刘玉群，胡 坚．营养学报，1986；8(2)：171
87 刘智广，邵 军，陈镔馥．中华医学检验杂志，1992；15(6)：340
88 胡 放，张晓光，王保安等．中华医学检验杂志，1982；5(4)：217
89 揭念琴，杨景和，孟凡琴等．化学学报，1994；52：496
90 王怀公，杜康平．分析化学，1987；15(9)：864
91 慈云祥等．高等学校化学学报，1990；11(1)：81
92 揭念琴，杨景和等．理化检验(化)，1994；30(6)：364
93 张忆华等．吉林大学自然科学学报，1992；(4)：110
94 慈云祥，陈 列．北京大学学报(自)，1989；25(4)：389
95 张忆华，郑衍生，姚新华．吉林大学自然科学学报，1991；(4)：105
96 张晶玉，杨金夫，任 英等．光谱学与光谱分析，1994；14(5)：5
97 黄贤智，许金钩，李耀群．分析化学，1987；(3)：199
98 曹秋娥，徐其亨．分析化学，1993；21(12)：1472
99 王自勉等．中华医学检验杂志，1984；7(3)：144
100 任学贞，Miller. J. N. 生物化学与生物物理进展，1995；

22(1)：81

101 丁文娜，徐松林等．分析化学，1987；15(1)：17

102 康四清，邹肇娥，乔小春．华西医科大学学报，1991；22(3)：262

103 Yun Xiangci et al. Analyst. 1988；113(4)：679

104 潘小平，蔡金莲，张炳海等．生物化学与生物物理进展，1986；(3)：72

105 申建凯，谈柱三，吴　袁．中华医学检验杂志，1988；11(6)：361

106 张逍哲，赵会军，付宏杰等．生物化学与生物物理进展，1993；20(2)：136

107 张安胜等．中华医学检验杂志，1991；14(2)：90

108 唐爱国等．中华医学检验杂志，1988；11(2)：72

109 黄建鸣，董卡宁，许　峰等．生物化学与生物物理进展，1996；23(1)：70

110 郑秀龙，赵　芳，高建国．生物化学与生物物理进展，1983；51：58

111 左连富，刘洪祥，郭建文等．生物化学与生物物理进展，1988；15(6)：436

112 唐惟瑜，许福熙，L. Van Hove 等．上海医学，1991；14(5)：253

113 李桂兰，尹松年，柴玉香．中国医学科学院学报，1983；5(5)：311

114 林卓坤，李建平，林棍等．生物化学与生物物理进展，1985；(5)：54

115 慈云祥等．分析化学，1992；20(9)：1083

116 杨景和等．生物化学杂志，1996；12(2)：143

117 王光建，鲁长豪等．分析化学，1995；23(8)：933

118 张秀明，严丽娟，柴建开等．生物化学与生物物理进展，1996；23(2)：175

119 余瑞丽等．中华医学检验杂志，1987；10(1)：24

120 李　克，胡心宝．生物化学与生物物理进展，1993；20(1)：78

121 周　翔，辛中国，孙国光等．白求恩医科大学学报，1985；11(4)：358

122 李爱群，李　燕，吴　简．生物化学与生物物理进展，1987；(6)：72

123 刘　菊，曲晓刚，陆天虹等．分析化学，1994；22(12)：1238

124 王克勤，梁亚云．药学通报，1986；21(2)：84

125 慈云祥，王　芳．化学试剂，1990；12(3)：132

126 Ci Yunxiang, Wang Fang. Anal Chim Acta, 1990；233：299

127 李庆阁，赵一兵，许金钩等．分析化学，1994；22(9)：896

128 慈云祥，王　芳．分析化学，1990；18(4)：334

129 慈云祥，王　芳．北京大学学报(自)，25(2)：183

130 邬大元，陈鸿基，王章敏等．药物分析杂志，1993；13(3)：155

131 金　律，金鸿奎等．中国药理学报，1984；5(2)：89

132 侯永生，杨淑和等．中国医科大学学报，1984；13(3)：44

133 万海英，陈　宏，吴晓东等．江苏医药，1985；11(12)：662

134 夏　云，戴闻柱，周岳兰等．中华医学检验杂志，1989；12(3)：176

135 王慧琴，杨志斌．分析化学，1996；24(6)：681

136 王　伦，周运友等．分析化学，1995；23(1)：97

137 杨　波等．植物生理学通讯，1988；(6)：63

138 李志良，林辉概等．分析测试学报，1993；12(1)：51

139 郭祥群，许金钩，赵一兵等．高等学校化学学报，1992；13(10)：1225

140 向文玉，王　春等．药学通报，1986；21(7)：400

141 王文韵，汤又文．光谱学与光谱分析，1990；10(2)：12

142 张立明，俞永祥．药学学报，1985；20(10)：752

143 张贵珠，张海清，何锡文等．高等学校化学学报，1995；16(1)：43

144 李志良，俞汝勤．药学学报，1989；24(2)：127

145 鄢　远，彭学军等．分析测试学报，1995；14(1)：1

146 程务本，戎大海，孙时良等．上海第一医学院学报，1981；8(5)：361

147 程务本，戎大海，孙时良．上海第一医学院学报，1982；9(5)：339

148 郭连兴，马淑清．中华医学检验杂志，1994；17(3)：158

149 袁其晓，李伟雄．中华妇产科杂志，1979；14(3)：134

150 程务本，戎大海等．药学通报，1980；15(4)：10

151 李文奇．食品与发酵工业，1996；(2)：38

152 高从元，张莅峡等．药物分析杂志，1983；3(4)：215

153 朱亚先，张　勇，李少霞等．分析化学，1995；23(11)：1313

154 沈爱宝，章竹君．分析化学，1996；24(5)：569

155 任延军，阚宁宁．中国医院药学杂志，1992；12(11)：488

156 曹卫军，陈素娥，樊艳平等．高等学校化学学报，1995；16(3)：363

157 叶蕴玲，方　策，李海蓉．色谱，1994；12(2)：128

158 林　岩，沈含熙，黄汉国．高等学校化学学报，1996；17(2)：211

159 黄如衡，徐　旭．药学学报，1989；24(1)：37

160 陈鸿基，陈　珂，翁幼萍等．中国临床药理学杂志，1991；7(1)：55

161 郭祥群，许金钩，赵一兵等．高等学校化学学报，1992；13(9)：1199

162 于彦彬，潭培功．分析化学，1995；23(12)：1470

163 张君仁，庞　华，刘新泳等．中国药学杂志，1995；30(7)：428

164 王似菊，沈向忠，宗　俭．中国医药工业杂志，1993；24(9)：411

165 王唯红，张君仁等．药物分析杂志，1996；16(1)：30

166 王绪明．国外分析仪器技术与应用，1992；(3)：55

167 何锡文，唐　波，沈含熙．高等学校化学学报，1995；16(1)：26

168 李留树，何长清，肖荣庄．抗生素，1984；9(2)：103

169 孙汶生．中华医学检验杂志，1986；9(4)：234

170 胡乃梁，王冬媛，赵一兵等．分析试验室，1996；15(1)：46

171 赵一兵，常文保，慈云祥．高等学校化学学报，1992；13(11)：1378

172 赵一兵，余志雄，郭祥群等．高等学校化学学报，1992；13(10)：1233

173 吴念朱，陈雪玲，陈建国．药学通报，1985；20(4)：216

174 李敬涵，李国忱．药物分析杂志，1983；3(1)：53

175 Chang W Bet al. Analyst, 1992；117(8)：1377

176 贺浪冲，张阿慧，李西玲等．药物分析杂志，1993；13(5)：343

177 赵一兵，郭祥群，许金钩等．高等学校化学学报，1993；14(5)：625

178 张秀国，刘琴棣等．药学通报，1983；18(9)：32

179 唐红芳，王佑申．药物分析杂志，1990；10(6)：358

180 李留树，何长清，聂光荣．中华结核和呼吸系疾病杂志，1984；7(3)：139

181 杨雅平，李永庆．药物分析杂志，1983；3(3)：160

182 蒋新田，丁　明．分析化学，1989；17(9)：823

183 杨 梅，张文伟等．分析化学，1996；24(6)：740
184 庞志功，汪宝琪等．分析化学，1996；24(6)：703
185 黄鸳鸾，陈日南．医药工业，1987；18(8)：363
186 王巖英，杜小英．药物分析杂志，1983；3(4)：226
187 欧阳耀国，蔡维平等．分析化学，1992；20(1)：48
188 庞志功，汪宝琪，高连洪．药物分析杂志，1991；11(6)：344
189 汪宝琪，庞志功，朱慧勤．沈阳药学院学报，1994；11(4)：242
190 董测建，刘昌玲．军事医学科学院院刊，1993；17(4)：301
191 王惠宁，胡慧芳．上海第二医科大学学报，1993；13(4)：297
192 赵慧春，闫娜花，郭金雪．分析试验室，1994；13(5)：36
193 荀莉萍，许金钩．分析化学，1992；20(5)：499
194 庞志功，汪宝琪等．分析化学，1994；22(4)：363
195 赵一兵，王冬媛等．分析化学，1995；23(9)：1055
196 王惠宁，仇淑秋，胡慧芳．中国中药杂志，1991；16(9)：555
197 庞志功，汪宝琪，沈方香．中国中药杂志，1991；16(8)：485
198 陈 强等．沈阳药学院学报，1994；11(1)：34
199 吴 桥，邹 健等．药物分析杂志，1988；8(3)：158
200 程 颖，阚宁宁等．药物分析杂志，1993；13(3)
201 何家俊，任 英，张文毅．分析化学，1993；21(8)900
202 王绪明，万日文．国外分析仪器技术与应用，1990；(2)：28

参 考 文 献

1 陈国珍，黄贤智等编．荧光分析法(第二版)．北京：科学出版社，1990.
2 李耀群，黄贤智．分析化学，1989；17(12)：1154
3 李建军，陈观铨等．光谱学与光谱分析，1993；13(3)：117
4 胡继明，陈观铨等．分析化学，1992；20(3)：356
5 潘利华，董向明等．分析化学，1989；17(9)：799
6 潘利华，刘莉萍等．分析化学，1988；16(9)：779
7 Lakowicz J R．Principles of Fluorescence Spectroscopy．New York：Plenum Press．1983
8 郑永章译．分析化学译刊，1987；4(5－6)：145
9 黄贤智，陈 胜．分析化学，1992；20(3)：300
10 郑永章译．分析化学译刊，1987；4(3－4)：140
11 范世福译．国外分析仪器技术与应用，1986；(4)：35
12 常文保，张柏林，慈云祥．分析化学，1994；22(11)：1167
13 姚风姬，聂 雪，慈云祥．化学试剂，1994；16(3)：156
14 胡天喜．生物化学与生物物理进展，1987；(5)：8
15 李振甲，杨梅芳，陈泮藻．中华医学检验杂志，1988；11(6)：368
16 王杰民，秦芝玲．药物分析杂志，1985；5(3)：185
17 陈惠文．国外分析仪器技术与应用，1987；(1)：14
18 S. G. Schulman, Molecular Luminescsnce Spectroscopy Methods and Applications, part 1. New York：Wiley，1985.
19 祝大昌等译．分子发光分析法(荧光法和磷光法)．上海：复旦大学出版社，1985
20 曹秋娥，徐其亨．化学试剂，1993；15(5)：289

第二十四章　磷光分析和化学发光分析

第一节　磷 光 分 析

一、概　　述[1~3]

磷光是分子中电子激发的三线态 T_1 回到基态 S_0 而产生的辐射。由于 $T_1 \rightarrow S_0$ 是禁阻的，其可能性仅为 $S_1 \rightarrow S_0$ 过程的可能性的百万分之一。磷光寿命较长，从千分之一秒到数秒，有的更长些。由于寿命长，在发射光子以前，分子的碰撞运动，会使 T_1 电子经无辐射弛豫返回基态，此即所谓磷光猝灭。为克服猝灭现象，常把分子固定成刚性体，如将样品置于 77K 的液氮或甚至 4K 液氦中固化而后测定，这叫做低温磷光（LTP）；也可将样品固定在滤纸、层析板等固体载体上，或固定于胶束或环糊精内等，而后测得的就是室温磷光（RTP）。

在分子中引入重原子取代基，或者应用含重原子的溶剂时，常会导致荧光的量子产率相对减小，磷光的量子产率相对增大，这种效应称为重原子效应。重原子效应是提高磷光测定灵敏度的简单有效手段。常用的重原子微扰剂有碘化物、溴化物、Ag^+ 盐、Pb^{2+} 盐、Tl^+ 盐和二甲基汞等。顺磁性离子也会促进 $S_1 \rightarrow T_1$ 体系间窜跃而增强磷光，因而顺磁性金属离子的螯合物通常是发磷光的。

在 1975 年以前，绝大多数的磷光分析是在低温（液氮冷却）条件下进行的。由于低温磷光分析需要冷冻装置，使用的溶剂受到限制，操作亦诸多不便，因而近 20 几年来室温磷光分析的研究普遍引起重视，也取得了较大的发展。下面简单介绍几种室温磷光法。

1. 固体基质室温磷光法（SS-RTP）

SS-RTP 是将在低温下能发磷光的被分析物溶液（水溶液或有机溶液），点滴在滤纸、硅胶色层板、或氧化铝色层板等固体基质（衬底）上，用红外灯烤干，使磷光物质强烈地吸附（固着）在固体基质上，以保持刚性。有时还在原处点滴上 $AgNO_3$、$Pb(CH_3COO)_2$、$TlCH_3COO$ 或 NaI 等重原子微扰剂溶液，再烤干，在干燥气流保护下进行磷光测量。

2. 胶束增稳室温磷光法（MS-RTP）

一般情况下溶液的室温磷光太弱而没有分析应用价值，但在含重原子和表面活性剂的溶液中，通氮除氧后可观察到室温磷光。

3. 环糊精诱导室温磷光法（CD-RTP）

CD-RTP 是在液态水相真溶液中进行磷光测量的方法。环糊精分子的刚性筒形空腔，可以作为试样分子藏身的场所，生成主客复合物。如果环糊精的空腔，还能同时容纳含有重原子的分子，由于外部重原子效应，将会使受激分子诱导产生系间跨越，转到三线态（T_1），并产生 RTP。

4. 增敏/猝灭流体室温磷光法（S/Q-RTPL）

增敏流体室温磷光（S-RTPL）是一种间接的分子发射光谱法。该法需要寻找一种合适的受体物质（记作 B）。其条件有 3 个：

①受体应具有较低的三线态能量；

②受体应能在室温下发磷光，且有很高的磷光量子产率；

③在为被分析物（记作 A）所选定的激发波长下，该受体 B 不被激发，或很少被激发。

一般用作受体的物质是联乙酰（2,3-丁二酮）和 1,4-二溴代萘。被分析物（A）是作为能量给体，A 在 77K 的刚性溶液中应能发 LTP，只是在室温下的流体中，由于非辐射去活化作用强烈，A 不发磷光。A 的激发态能量应比 B 的激发态能量高，当 A 在选定的激发波长下受激，并经系间跨越至其最低激发三线态，且溶液中的受体浓度足够大时（联乙酰的浓度至少应大于 $10^{-4}mol \cdot L^{-1}$），就发生能量变换，使联乙酰受激，并发出磷光。通过测量联乙酰的 RTP 强度，就可间接地测定被分析物 A 的浓度。

Q-RTPL 法与上述过程相反，磷光体 B 先在它自己的激发波长下被激发，发生电子跃迁，经系间跨越成为最低激发三线态，A 猝灭一部分磷光，磷光猝灭的程度与 A 的浓度成正比。

5. 胶态微晶室温磷光法（CM-RTP）

CM-RTP 是在胶态微晶悬浊液的界面上产生的 RTP。CM-RTP 的特点是不必除氧，也不加重原子微扰剂，但其磷光强度与被分析物的浓度之间关系是非线性的，难以定量分析。

6. 微乳状液增稳室温磷光法（ME-RTP）[15]

当适量的水、非极性溶剂、表面活性剂、辅助表面活性剂（C_4～C_6 烷基醇）混合时，可自发地形成微乳状液。如果是非极性被分析物先溶解在某种非极性溶剂中，这种溶液慢慢地与醇混合，然后再与表面活性剂的水溶液混合，几秒钟后可得到清澈的微乳状液。这种方法可克服非极性被分析物溶解度低带来的分析困难。

此外，同步扫描、激发-发射矩阵、导数光谱、时间分辨和相分辨等新技术亦曾应用于磷光分析。

二、应　　用

磷光分析法在无机痕量物质测定方面的实际应用还很少，表 24-1 给出了无机化合物磷光分析应用实例。RTP 很适合于作有机物及生化物质的分析，在生命科学、临床化学、药物化学、环境科学、能源科学等各方面都很有用。对于有磷光的物质，据实际情况先采用不同条件进行分离、提取和纯化，再按其磷光性质测定激发光谱、发射光谱、相对强度及线性关系范围、最低检出量等。许多物质无磷光或很弱，不能直接测定，须衍生化后，变为有磷光物质再测定。某些有机化合物磷光分析应用实例见 1297 页表 24-2。

表 24-1　某些无机化合物磷光分析应用实例

被测物	试　　剂	检出限	文献	被测物	试　　剂	检出限	文献
Cu（Ⅱ）	初卟啉 Ⅰ	1ng	1,2	B（Ⅲ）	二苯甲酰甲烷	0.1ng·ml⁻¹	8，9
In（Ⅲ）	初卟啉 Ⅰ	1μg	1		苯甲酰丙酮	0.4ng·ml⁻¹	9,10,11
Be（Ⅱ）	二苯甲酰甲烷	—	3,4,5	Nb（Ⅴ）	8-羟基喹啉	0.18ng·ml⁻¹	12
	2-(2′-羟基苯基）苯并噁唑	10ng·ml⁻¹	6	Gd（Ⅲ）	双(8-羟基-2-喹啉基)甲胺	—	13
	二苯甲酰甲烷-吡啶	0.4ng	7				

本表参考文献：

1　Solov′ev E A，Bozhevol′nov E A，Lebedeva N A et al. Zh Anal Khim，1969；24：231

2　Solov′ev E A，Lebedeva N A，Sidenko Z S. Zh Anal Khim，1974；29：1531

3　Solov′ev E A，Bozhevol′nov E A. Metod Anal Khim Reakt Preparat，1965；(11)：21

4　Bozhevol′nov E A，Solov′ev E A. Sovrenen Metod Anal Metod Issled Khim Sost Stroen Veshch，Nauka，Moscow；1965：75

5　Bozhevol′nov E A，Solov′ev E A. Priklad Spectr，Mater. 16 Soveshch. Nauka，Moscow；1969：166

6　Holzbecher Z，Hejtmanek M，Sobalik Z. Coll Czech Chem Comm，1978；43：3325

7　Meshkova S B，Potapova S F，Kononenko L I et al. Zh

Anal Khim. 1977; 32: 1529
8 Marcantonatos M, Gamba G, Monnier D. Helv Chim Acta, 1969; 52: 538
9 Marcantonatos M, Gamba G, Monier D. Anal Chim Acta, 1973; 67: 220
10 Marcantonatos M, Gamba G, Monier D. Helv Chim Acta, 1969; 52: 2183
11 Gamba G, Marcantonatos M. Helv Chim Acta, 1971; 54: 1509
12 Kirkbright G F, Thomson J V, West T S. Anal Chem. 1970; 42: 782
13 Golovina A P, Kachin S V, Runov V K. Vestn Mosk Univ Ser Khim, 1977; 18: 709; Chem Abstr 89, 119941k

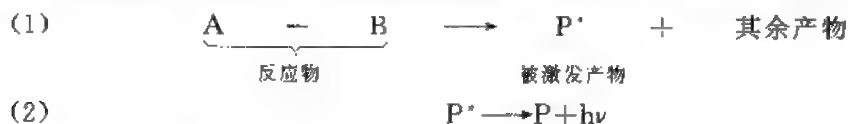
第二节 化学发光分析

一、概 述

化学发光分析是近年来发展起来的一种高灵敏度的痕量分析方法。这种方法具有仪器设备简单、操作方便、灵敏度高、线性响应范围宽等显著优点。作为一种有效的微量分析和痕量分析手段，化学发光分析法已广泛应用于矿物岩石分析、材料分析、环境保护监测、药物分析和临床分析等方面。

（一）原理

在一些特殊的化学反应中，由于吸收了反应所释放出的化学能而处于电子激发态的反应中间体或反应产物由激发态回到基态时所产生的一种光辐射即为化学发光（Chemiluminescence)。通常的化学发光是在有机物（偶尔也有无机物）被过氧化氢、分子氧、次氯酸盐以及其他氧化剂氧化的液相氧化反应中或气相氧化反应中观察到。所有化学发光反应的普遍特征都是放热的简单步骤，它导致反应产物电子激发态的不平衡，这些激发态可以通过光量子的辐射（化学发光）而失活。化学发光包括激发作用（1）和辐射作用（2）二步过程：



(2) $P^* \longrightarrow P + h\nu$

化学发光的强度决定于反应物分子或催化剂的浓度，因此可根据化学发光反应在某一时刻的发光强度（如峰强度值）或发光总量来确定反应中相应组分的含量，这种分析方法就是化学发光分析。此法用光电倍增管检测，各种微机化的化学发光分析仪，既提高了分析的速度，也改善了分析的精度。

（二）化学发光试剂[4~6]

化学发光试剂是液相化学发光分析的基础物质，应用化学发光量子产率高的化学发光剂，对提高化学发光分析的灵敏度及扩大此方法的应用范围有重要意义。常用的化学发光剂有鲁米诺、光泽精、洛酚、吖啶酯、过氧化草酸酯、荧光虫素等。鲁米诺是国内商品化最早的化学发光剂（冷光剂），它的化学发光量子产率高，水溶液稳定，能被多种氧化剂直接氧化发光，也可被众多的金属离子催化发光反应而发光。许多无机、有机和生化组分能增强或抑制其发光，有的氧化反应或催化反应还能与鲁米诺的化学发光反应相偶合，使鲁米诺系统中难于直接测定的元素或无机组分被间接测定，应用范围十分广泛。

其他化学发光试剂有邻菲咯啉、磺基水杨酸、对氨基苯磺酸、罗丹明B、苏木色精、培花青、茜素紫、吐温-40、香豆素、蒽绿、没食子蓝、酸性靛蓝、槲皮素、三苯甲烷类染料、丙酮、乙醇和羟胺等。这些化学发光剂均是分析化学中常用的试剂，商品化程度高，价廉，使用方便。但总的来说，它们的化学发光量子产率都较低，大多数在10^{-3}以下。而且一般只有少数几种金属离子对发光反应有催化作用，虽然选择性较好，但应用范围较窄。

表 24-3 某些有机化合物磷光分析应用实例

表中符号：SDS—十二烷基硫酸钠；TL—[illegible]试剂

被测物质	λex/λem/nm	体系	方法	诱导剂	线性范围/(g·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)	RSD/%	实验条件	应用	文献
氯丙嗪	[illegible]/[illegible]	氯丙嗪-HCl-EtOH	LTP-77K		$(2.5\times10^{-8}\sim7.5\times10^{-5})$	10	35.71	0.05mol·L⁻¹ HCl	血液	1
[illegible]	328/[illegible]	[illegible]-NaOH-NaI	SS-RTP	NaI	$(5.0\times10^{-9}\sim8.03\times10^{-6})$g	0.4ng/斑点	3.3	pH11.5		2
	310/482	[illegible]-NaOH-$Tl_2(SO_4)_3$	SS-RTP	$Tl_2(SO_4)_3$	$(5.3\times10^{-9}\sim1.3\times10^{-6})$g	6ng/斑点	4	pH11.5		2
	Δλ=[illegible]nm 同步激发时 350nm	[illegible]-NaOH-NaI-NaAc-Na_2CO_3	同步扫描 SS-RTP	NaI-NaAc	$(2\times10^{-8}\sim5\times10^{-5})$mol·L⁻¹	1.4ng	3.5	pH11.5	混合试样	4
	Δλ=[illegible]nm	[illegible]-NaOH-NaI-NaAc-Na_2CO_3	同步扫描-导数 SS-RTP	NaI-NaAc	$(0.9\times10^{-9}\sim1.07\times10^{-6})$g	0.29ng/斑点	4.1	pH11.8	混合试样	4
2,6-二氯苯酚[illegible]	Δλ=[illegible]nm 同步扫描时 390nm	2,6-二氯苯酚-NaOH-NaI-NaAc-Na_2CO_3	同步扫描 SS-RTP	NaI-NaAc	$(2\times10^{-8}\sim2\times10^{-5})$mol·L⁻¹	2.7ng	4.5	pH11.8	混合试样	3
	Δλ=[illegible]nm	2,6-二氯苯酚-NaOH-NaI-NaAc-Na_2CO_3	同步扫描-导数-SS-RTP	NaI-NaAc	$(5\times10^{-9}\sim3\times10^{-6})$g	0.7ng/斑点	5.0	pH11.5	混合试样	4
	290/[illegible]	2,6-二氯苯酚-NaOH-NaI-NaAc-Na_2CO_3	SS-RTP	NaI-NaAc	$(10^{-8}\sim10^{-5})$mol·L⁻¹	1.8ng	5.0	pH11.5		5
[illegible]	282/[illegible]	[illegible]-EtOH-NaOH-NaH_2PO_4	SS-RTP	KI-NaAc	$(10^{-8}\sim5\times10^{-5})$mol·L⁻¹	[illegible]ng/斑点	3.1	pH[illegible]	生化试剂	6
[illegible]	273/[illegible]	[illegible]-HCl	SS-RTP	NaI-NaCl	$(1.3\times10^{-8}\sim3\times10^{-5})$mol·L⁻¹	0.6ng/斑点	1.67	0.1mol·L⁻¹ HCl		7
[illegible]	3[illegible]/[illegible]	[illegible]-乙醇	LTP-77K	KI	$(1\times10^{-8}\sim4\times10^{-5})$g $(1\times10^{-8}\sim4\times10^{-5})$g $(1\times10^{-8}\sim4\times10^{-5})$g	[illegible]ng	5.6	pH[illegible]	药物	8
[illegible]	3[illegible]/424	[illegible]-全血清	LTP-77K		$(0\sim2.0\times10^{-7})$g	2ng	0.20	pH12.39	动物血液、药物分析	9
[illegible]	27[illegible]/390	[illegible]-NaOH-Na_2HPO_4-KH_2PO_4-HCl-EtOH	LTP-77K		$(0\sim6\times10^{-7})$g	30ng	8.8	pH7	[illegible]	10
[illegible]	30[illegible]/454	[illegible]-全血清	LTP-77K	—	$(0\sim5\times10^{-7})$g	5ng	5.0	0.1mol·L⁻¹ HCl	[illegible]	11
[illegible]	30[illegible]/424	[illegible]-全血清	LTP-77K		$(0\sim3\times10^{-7})$g	5ng		0.1mol·L⁻¹ KH_2PO_4	[illegible]	11
[illegible]	30[illegible]/424	[illegible]-全血清	LTP-77K	—	$(0\sim3\times10^{-7})$g	5ng	4.4	pH8.4	[illegible]	11
[illegible]	29[illegible]/445	[illegible]-NaI-NH_3	SS-RTP	NaI	$(2.24\times10^{-8}\sim9.6\times10^{-5})$mol·L⁻¹	8.7×10^{-9}mol·L⁻¹	0.38	pH9.5	[illegible]	12
[illegible]	290/[illegible]	[illegible]-$TlNO_3$	RTP	$TlNO_3$	—	—		pH9		13

续表

被测物质	$(\lambda_{ex}/\lambda_{em})$/nm	体系	方法	微扰剂	线性范围/(g·ml^{-1})	检出限/(ng·ml^{-1})	RSD/%	反应条件	应用	文献
α-萘乙酸	275/495	α-萘乙酸-1,2-二溴丙烷-β-环糊精	CD-RTP	1,2-二溴丙烷	$(0\sim10^{-5})$mol·L^{-1} $(0\sim10^{-5})$mol·L^{-1} $(0\sim10^{-5})$mol·L^{-1}	—	1.40	pH2.0~6.0		14,15
7-甲基喹啉	316/510	7-甲基喹啉-1-溴环己烷-β-环糊精	CD-RTP	1-溴环己烷	$(3\times10^{-7}\sim7\times10^{-5})$mol·L^{-1}	3×10^{-7} mol·L^{-1}	4.62			16
6-巯基嘌呤	320/495	6-巯基嘌呤-[illegible]-乙醇-Pb(Ac)$_2$	SS-RTP	Pb(Ac)$_2$	$(4\times10^{-15}\sim2\times10^{-10})$mol	$<5\times10^{-14}$ mol	—	2mol·L^{-1} HAc		17
α-溴代萘	294,285/498	α-溴代萘-β-环糊精-环己烷	CD-RTP, S-RTPL		$(0\sim4\times10^{-5})$mol·L^{-1}	3.27×10^{-8} mol·L^{-1}	3.2		芳香烃混合物	18
[illegible]	315/495	哈尔明-滤纸-KI	SS-RTP	KI	$(1\times10^{-12}\sim1.5\times10^{-8})$g		1.75		[illegible]	19
核黄素	400/580	核黄素-醋乙醇	SS-RTP	Hg(Ac)$_2$	$(5\times10^{-8}\sim1\times10^{-5})$mol·L^{-1}	5.77	4.3		制剂	20
色氨酸	290/430	甲-三氯乙酸-色氨酸	LTP/77K	—	·	—	3.2	pH6.3	血	21
	295/440	乙醇-NaI-Na$_2$CO$_3$	SS-RTP	NaI Na$_2$CO$_3$	$10^{-5}\sim10^{-6}$ $10^{-5}\sim10^{-4}$ $10^{-5}\sim5\times10^{-4}$	0.4ng	—	pH9~10	药物	22
丙酮	271/515	丙酮-丁二酮	S-RTPL	—	$(2.0\times10^{-4}\sim1.5\times10^{-2})$mol·L^{-1}	8.0×10^{-5} mol·L^{-1}	0.76	pH6	水	23
水分含量	(287~300)/(445~475)	—	RTP	—	(6.5~8.0)% (7.0~10)%	—	—	—	淀粉	24
2-萘酚	330/510	2-萘酚-乙醇-NaI	SS-RTP	NaI	$(1.4\times10^{-6}\sim7.5\times10^{-5})$mol·L^{-1}	1.44×10^{-6} mol·L^{-1}	1.84	pH7.5~12.3	工业废水	25
芘	335/480	芘-β-环糊精-环氧溴丙烷	CD-RTP	环氧溴丙烷	$(3\times10^{-7}\sim5\times10^{-5})$mol·L^{-1}	3×10^{-7} mol·L^{-1}	4.0			26
	同步磷光法 Δλ=155nm	芘-丙酮-SDS-TlNO$_3$-芘	ME-RTP	TlNO$_3$	$(10^{-6}\sim10^{-4})$mol·L^{-1}	3.9×10^{-6} mol·L^{-1}	3.5	1.2×10^{-2}mol·L^{-1}H$_2$SO$_4$	多环芳烃混合物	27
荧蒽	Δλ=186nm	荧蒽-丙酮-SDS-TlNO$_3$-芘	同步扫描 ME-RTP	TlNO$_3$	$(2\times10^{-8}\sim2\times10^{-5})$mol·L^{-1}	1.2×10^{-8} mol·L^{-1}	2.1	1.2×10^{-2} mol·L^{-1} H$_2$SO$_4$	人工混合样	27
	Δλ=185	荧蒽-丙酮-SDS-TlNO$_3$-芘			$(1\times10^{-8}\sim1\times10^{-5})$mol·L^{-1}	4.7×10^{-9} mol·L^{-1}	3.2			
	Δλ=191	荧蒽-丙酮-SDS-TlNO$_3$-对二甲苯			$(1\times10^{-8}\sim2\times10^{-5})$mol·L^{-1}	1.5×10^{-8} mol·L^{-1}	2.5			
	Δλ=186nm	荧蒽-丙酮-SDS-TlNO$_3$-芘	同步-ME-RTP	TlNO$_3$	$(2.2\times10^{-8}\sim10^{-5})$mol·L^{-1}	1.8×10^{-8} mol·L^{-1}	2.4	5×10^{-2}mol·L^{-1}H$_2$SO$_4$	人工合成样	29
	Δλ=188nm dλ=4nm	荧蒽-丙酮-SDS-TlNO$_3$-芘	同步-导数 ME-RTP	TlNO$_3$	$(10^{-8}\sim10^{-5})$mol·L^{-1}	1.1×10^{-8} mol·L^{-1}	2.7	1.2×10^{-2}mol·L^{-1}H$_2$SO$_4$	人工混合样	28
芘	Δλ=186nm dλ=4nm	荧蒽-丙酮-SDS-TlNO$_3$-芘	同步-导数 ME-RTP	TlNO$_3$	$(1\times10^{-8}\sim2\times10^{-5})$mol·L^{-1}	3.5×10^{-9} mol·L^{-1}	3.0	1.2×10^{-2}mol·L^{-1}H$_2$SO$_4$	人工混合样	28
	Δλ=186nm	荧蒽-丙酮-SDS-TlNO$_3$-芘	同步扫描-ME-RTP	TlNO$_3$	$(10^{-8}\sim10^{-5})$mol·L^{-1}	7.8×10^{-9} mol·L^{-1}	2.3	1.2×10^{-2}mol·L^{-1}H$_2$SO$_4$	人工混合样	27

续表

被测物质	($\lambda_{ex}/\lambda_{em}$)/nm	体系	方法	微扰剂	线性范围/(g·mL^{-1})	检出限/(ng·mL^{-1})	RSD①/%	反应条件	应用	文献
芘	$\Delta\lambda$=185nm	芘-环糊精-丙酮-SDS-$TlNO_3$	同步扫描-MS-RTP	$TlNO_3$	(2.7×10^{-7}~4×10^{-5})mol·L^{-1}	1.2×10^{-8} mol·L^{-1}	3.0		人工合成样	29
对三联苯	$\Delta\lambda$=191nm	环糊-对三联苯-丙酮-SDS-$TlNO_3$	同步扫描-MS-RTP	$TlNO_3$	(1×10^{-7}~4×10^{-5})mol·L^{-1}	5.6×10^{-8} mol·L^{-1}	3.3	1.2×10^{-3}mol·L^{-1} H_2SO_4	人工合成样	27
	268/(526,546)	p-TP-m-TP-Tl_2SO_4-丙酮	二阶导数-SS-RTP	Tl_2SO_4	(4.6×10^{-11}~4.5×10^{-8})g	0.07ng/斑点	4.2		人工合成样	30
	$\Delta\lambda$=180nm	p-TP-m-TP-Tl_2SO_4-丙酮	同步扫描SS-RTP	Tl_2SO_4	(4.6×10^{-12}~4.5×10^{-8})g	0.15ng/斑点	3.9		人工合成样	31
间位三联苯	285/(446,460)	p-TP-m-TP-Tl_2SO_4-丙酮	二阶导数-SS-RTP	Tl_2SO_4	(4.5×10^{-11}~4.0×10^{-8})g	0.14ng/斑点	3.9		人工合成样	30
	$\Delta\lambda$=180nm	p-TP-m-TP-Tl_2SO_4-丙酮	同步扫描SS-RTP	Tl_2SO_4	(4.5×10^{-12}~9.2×10^{-8})g	0.21ng/斑点	3.7	—	人工合成样	31
萘	285/515	萘-SDS-$TlNO_3$	MS-RTP	$TlNO_3$	(1×10^{-6}~7×10^{-5})mol·L^{-1}	1×10^{-6} mol·L^{-1}	1.14	[illegible]		32
芘、苯并[a]芘		芘-苯并[a]芘-TlAc-$Pb(Ac)_2$-乙醇	SS-RTP	TlAc-$Pb(Ac)_2$	(2×10^{-11}~6×10^{-9})g (2.5×10^{-11}~10^{-9})g	—	—	—	[illegible]	33
国产固体基底	—	—	SS-RTP	—	—	—	—	—		34
国产滤纸	—		SS-RTP	KI	—					35

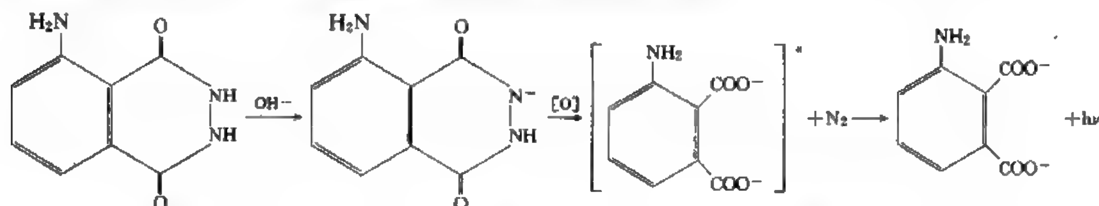
① RSD 相对标准偏差。

本表参考文献

1 黄宜斋，徐 旭．药学学报，1984；19(8)：606
2 董 川，魏建华，刘长松．分析化学，1992；22(10)：1065
3 董 川，刘长松，冯克聪．分析化学，1993；21(1)：45
4 刘长松，董 川，冯克聪．分析化学，1992；20(9)：998
5 董 川，冯克聪，刘长松．分析化学，1993；21(1)：47
6 朱若华，刘长松，张苏社．分析化学，1992；20(10)：1131
7 朱若华，刘长松，张苏社．分析化学，1993；21(2)：174
8 黄如新．药学学报，1993；28(2)：140
9 黄如新，徐 旭．药学学报，1988；23(4)：298
10 黄如新，周 东．中国药学杂志，1990；25(11)：663
11 黄如新，徐 旭．药学学报，1987；22(4)：284
12 朱广华，魏宏华．分析化学，1990；18(3)：215
13 博日吉汗·特日格图，印杰．高等学校化学学报，1994；15(8)：1260
14 张苏社，刘长松，卜玉龙．分析化学，1988；16(8)：687
15 张苏社，刘长松，卜玉龙．分析化学，1988；16(6)：494
16 魏丽声，刘长松，张苏社．分析化学，1991；19(5)：533
17 李隆弟，杨世忠．分析化学，1992；20(11)：1257
18 谢筑庆，许金钩，蔡国珍等．高等学校化学学报，1996；17(1)：46
19 张苏社，刘长松，杨功员．分析化学，1987；15(11)：980
20 双少敏，冯克聪，刘长松．分析化学，1991；19(4)：435
21 黄如新，纪贝莉．分析化学，1995；23(3)：245
22 冯克聪，李文斌，周惠文．分析化学，1990；18(11)：1046
23 陈祖武，许金钩．高等学校化学学报，1992；13(5)：590
24 张苏社，邓晓燕．分析化学，1989；17(4)：354
25 朱广华，魏宏华．环境化学，1991；10(4)：74
26 双少敏，刘长松，冯克聪等．分析化学，1991；19(11)：1265
27 曾 旗，董 川，魏建华等．高等学校化学学报，1996；17(5)：719
28 杨 帆，董 川，曾卫平等．高等学校化学学报，1996；17(4)：547
29 曾卫平，刘长松．分析化学，1993；21(5)：529
30 董 川，刘长松，冯克聪．高等学校化学学报，1993；14(3)：324
31 董 川，刘长松，冯克聪．光谱学与光谱分析，1994；14(1)：43
32 魏丽声，刘长松，张苏社．分析化学，1990；18(3)：228
33 崔文娟，魏润芳，徐丽白．分析化学，1992；20(11)：1247
34 双少敏，冯克聪，刘长松．分析化学，1991；19(4)：404
35 张苏社，刘长松，杨功员．分析化学，1987；15(10)：983

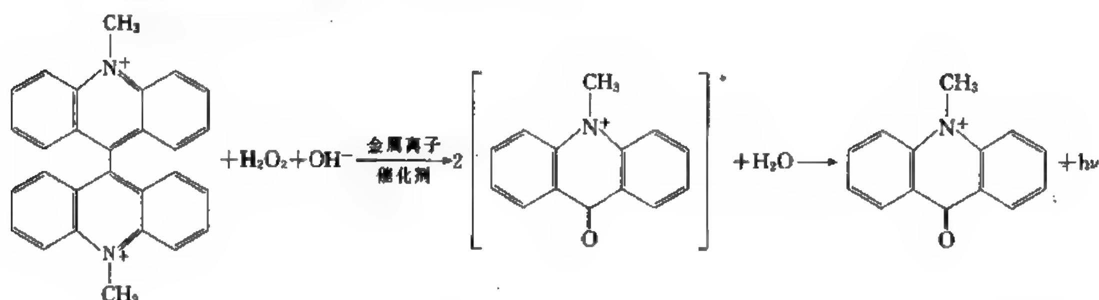
1. 鲁米诺化学发光反应

鲁米诺在碱性条件下可被一些氧化剂氧化，发生化学发光反应，辐射出最大发射波长为425nm 的化学发光。无论使用什么样的氧化剂和在什么样的反应介质中，鲁米诺的化学发光光谱都基本相同，这说明反应中吸收了化学能而处于激发态，然后通过能级跃迁释放出光子的发光体也是相同的。鲁米诺化学发光反应按如下历程进行：



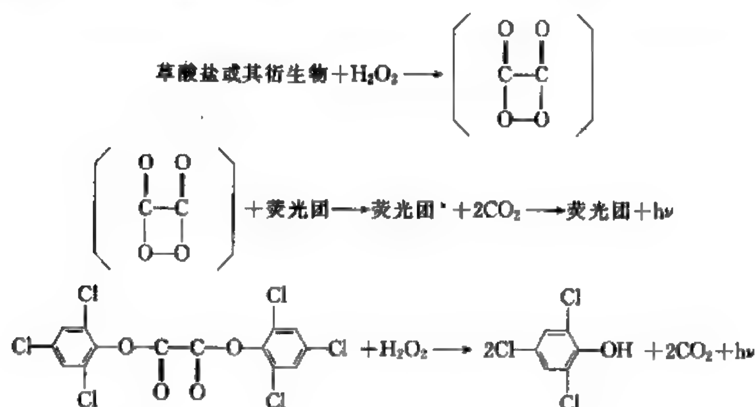
研究工作表明，Br^- 和 Cl^- 可以较大幅度地增强一些金属离子催化鲁米诺—H_2O_2 体系化学发光反应的发光强度。人们发现并合成了一系列能产生化学发光的鲁米诺衍生物，一般说来，含有供电取代基的衍生物都具有较高的发光效率。

2. 光泽精化学发光反应

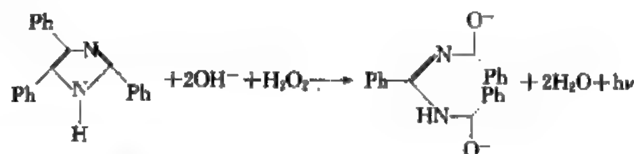


3. 草酸盐及其衍生物化学发光反应

该反应过程中生成一种高能中间产物——二噁基二酮，这个中间产物将其能量传递给荧光团使其成激发态，激发态的荧光团分子回到基态时而发光。发光反应如下：



4. 洛酚化学发光反应



(三) 液相色谱化学发光检测法[7]

化学发光分析法具有灵敏度高、线性范围宽和仪器简单等优点；再加上液相色谱的高效

分离特性，这就使液相色谱化学发光检测法（LC—CL法）成为一种有效的痕量及超痕量分析技术，非常适合于对环境、生物医学科学和临床化学等方面的复杂、低含量组分分析。在液相色谱化学发光检测法中，以过氧草酸酯化学发光体系和鲁米诺体系使用较多。已报导的还有光泽精、钌试剂、邻菲咯啉、没食子酸等体系。另外，生物发光反应、电致化学发光反应等其他化学发光反应在液相色谱中都有应用。

（四）胶束在化学发光分析中的应用[8]

由于目前适用的化学发光试剂少、化学发光试剂或反应产物的不溶性、对pH要求较高、及试剂昂贵等多种不利因素而使化学发光分析法与其他光度法相比，应用的普遍性差。而使用胶束体系作为化学发光分析的介质有许多潜在的优点：①能消除现存的溶解度问题，拓宽化学发光试剂的范围；②控制表面活性剂胶束的种类及浓度可改善化学发光反应的速度和激发效率；③使用胶束能降低有效化学发光所要求的pH，这在分析物经酶转变成化学发光测定物类型的化学发光反应中尤为重要；④改善实验环境，因而提高了分析方法的灵敏度和稳定性。

在化学发光反应中使用胶束介质的唯一缺点是可能降低分析方法的精密度。

（五）化学发光在脱氧核糖核酸探针杂交技术中的应用[9]

许多疾病的发生与体内重要的遗传物质——脱氧核糖核酸（DNA）的变化有着密切的关系。DNA诊断学的主要手段是DNA探针杂交技术，它是利用带有标记的寡核苷酸片段(DNA探针）与靶DNA进行杂交反应，通过检测杂交反应的有无来确定靶DNA中是否存在相应的DNA序列。最有发展前途的发光标记是吖啶酯衍生物和以稳定的1，2-二氧环乙烷衍生物作为底物的酶。

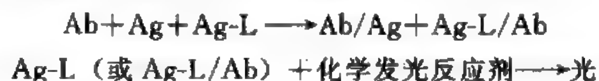
其他化学发光分析技术还有反相流动注射化学发光分析、纸色谱化学发光分析及固体表面化学发光分析[13]等，这些方法极大地丰富了化学发光分析的领域。化学发光传感器由于具有高灵敏度，又不需光源，近年来也受到了人们青睐[14]。

二、化学发光免疫分析与生物发光免疫分析

（一）化学发光免疫分析

化学发光免疫分析法（CLIA）是根据体内多种生物物质的生成或消耗均与H_2O_2有关，而H_2O_2的浓度和化学发光试剂的发光强度又存在着线性关系的原理拟定的[10]。

化学发光免疫分析法包括免疫反应和发光测定两部分，表示如下：



$$Ab+Ag+Ag\text{-}L \longrightarrow Ab/Ag+Ag\text{-}L/Ab$$

$$Ag\text{-}L（或 Ag\text{-}L/Ab）+化学发光反应剂 \longrightarrow 光$$

式中 Ag——抗原；
Ab——抗体；
L——化学发光标记物。

化学发光试剂可以直接参与一个免疫测定系统，如鲁米诺及其衍生物作为标记物；化学发光试剂也可以间接参与一个免疫测定系统，如过氧化物酶或葡萄糖氧化酶作为标记物，鲁米诺就作为化学发光反应剂参与反应。当化学发光剂直接作标记物参与免疫测定时又可根据测定体系不同分为均相测定和异相测定两类[11]。

1. 均相CLIA

所谓均相测定，就是反应混合体系不需要进行分离即可直接测定，这需要与抗体结合的

部分和游离的部分发光强度上有明显不同。

2. 异相 CLIA

异相测定是指将抗体结合的与游离的部分分离后进行测定的方法。又可分为一般固相法和双抗体“夹心”法。

(1) 一般固相法　先将特异性的 IgG 抗体结合于聚乙烯试管壁上，然后与发光标记的抗原反应，弃去反应混合物，并用缓冲液冲洗管壁以除去未结合的抗原和其他干扰物体，最后加入适当的氧化体系激发化学发光并测定。

(2) 双抗体“夹心法”　先将抗体涂在一种固相载体的表面，然后加入抗原与其反应（如保温 2h），除去反应液并冲洗，再加入发光标记的抗体，这时抗原被固相抗体和标记的抗体夹在中间，故称为“夹心”法。当一个抗原分子可以与多个标记的抗体分子相结合时，这种“夹心”法尤为适用。

流动注射技术与固相免疫分析技术相结合，可提高免疫分析的分析速度和自动化程度。以键合有抗体的多孔玻璃作为固相免疫分析的免疫反应器，以化学发光作为最终检测方法，建立了一种新的、高效率的免疫分析技术——流动注射化学发光免疫分析技术[12]。

(二) 生物发光免疫分析[6]

生物发光是产生于生物体系中的化学发光。生物发光不需要光照激发，它的能量来自氧化反应本身，是由发光素酶催化发光素与分子氧反应产生中间激发态，再回到基态过程中产生发光。在生物发光基础上又建立起生物发光免疫分析法（BIA）。在 BIA 中，标记酶有萤火虫荧光素酶，细菌荧光素酶和葡萄糖-6-磷酸脱氢酶（G-6-PDH）。

1. 萤火虫荧光素酶发光体的发光机理

此生物过程比较复杂，反应物包括萤火虫荧光素酶、荧光素、ATP、氧气和 2 价金属离子。其反应历程可简单表示如下：



$$LH_2+ATP\text{-}Mg^{2+}+E \longrightarrow E\cdot LH_2\cdot AMP+PPi$$



$$E\cdot LH_2\cdot AMP+O_2 \longrightarrow E+\ L{=}O\ +CO_2+AMP+\text{光}$$

式中　LH_2——荧光素；

E——荧光素酶；

PPi——焦磷酸盐；

ATP——三磷酸腺苷；

AMP——单磷酸腺苷；

L=O——氧化荧光素。

2. 细菌荧光素酶发光体的发光机理

细菌荧光素酶系列中，有细菌荧光素酶，黄素单核苷酸和直链脂肪族醛等参与反应，发光反应表达如下：



$$NAD^+ \longrightarrow NADH$$



$$NADH+FMN \xrightarrow{\text{氧化还原酶}} NAD^+ +FMNH_2$$



$$FMNH_2+O_2+\ R{-}CHO \xrightarrow{\text{荧光素酶}} FMN+\ R{-}COOH\ +H_2O+\text{光}$$

式中　NAD^+——辅酶 I；

NADH——还原型辅酶 I；

FMN——黄素单核苷酸；

$FMNH_2$——还原型黄素单核苷酸；

R—CHO ——直链脂肪醛。

荧光素酶的稳定性较差，标记物只能短期保存，在细菌荧光素酶系统发光原理基础上，用稳定的 G-6-PDH 代替荧光素酶作标记酶的生物发光免疫测定法更为实用。

三、应　　用

（一）无机物的分析

利用金属离子对化学发光反应的催化作用，是化学发光法分析无机物的基础，利用被测无机组分的氧化作用或对催化化学发光反应的抑制作用的研究报道也较多。无机物的化学发光分析应用实例见表 24-3。

（二）有机化合物的分析

有机化合物可以经过多种途径参与化学发光反应而被测定。如被测组分作为反应物、催化剂、淬灭剂、能量接受体和通过酶促转化反应的产物等形式参与化学发光反应。有机物的化学发光及生物发光分析应用实例见表 24-4。

（三）在生物医学中的应用

化学发光免疫测定在生物医学研究中的应用主要集中在三个方面：①蛋白质特异性结合研究，这方面多结合临床的研究工作如体液中低水平含量的药物、激素或其他代谢产物的测定；②病毒和细菌感染的快速诊断；③粒细胞吞噬功能的研究。

化学发光免疫分析与生物发光免疫分析应用实例见表 24-5。

表 24-3　无机物的化学发光分析应用实例

表中符号：

Lm——鲁米诺；Lc——光泽精；Cat——催化剂；phen——邻菲罗啉；CTMAB——溴化十六烷基三甲铵；Inh——抑制剂；Red——还原剂；Qx——氧化剂

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)(RSD①/%)	反应条件	元素的作用	文献
Ag(Ⅰ)	四正丁基碘化铵-银(Ⅰ)-硫脲	$(1.0\times10^{-8}\sim3.0\times10^{-6})mol\cdot L^{-1}$	$8.0\times10^{-9}mol\cdot L^{-1}$ (4)	NaAc-HAc，pH5.0	Cat	1
	Lm-MnO_4^--OH^-	$1.0\times10^{-11}\sim1.0\times10^{-5}$	3.2×10^{-3}(≤4.3)	pH13	Cat	2
	Lm-乙二酸-NaOH-$K_2S_2O_8$	(0.5～50)ng	(8.4)	pH12	Cat	3
	Lm-$K_2S_2O_8$-Ag	$10^{-8}\sim10^{-5}$	5	—		4
	Lm-Cu(Ⅱ)-CN^-	$10^{-8}\sim10^{-7}$	8.6	—		5
	Lc-H_2O_2-丙酮-Ag(Ⅰ)	—	—	—		6
	Lc-H_2O_2	—	100	—	Cat	7
	Lm-$K_2S_2O_8$-2,2'-联吡啶	—	10	—	Cat	7
	Lm-$K_2S_2O_8$-NH_3	—	200	—	Cat	7
	Lm-$CuSO_4$-KCN-H_2O_2	—	1	—	Inh	7
	没食子酸-H_2O_2	—	300	—	Cat	7
As(Ⅲ)	Lm-I_2-As^{3+}	$10^{-9}\sim10^{-7}$	0.98(4)	pH11		8
	Lm-MnO_4^--As(Ⅲ)-Cu(Ⅱ)	$7.0\times10^{-9}\sim3.0\times10^{-6}$	6.8(3.4)	pH12	Inh	9
	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	$10^{-10}\sim10^{-5}$	6.0×10^{-3}	pH2.5	Red	10
	MoO_4^{2-}-I^--As(Ⅲ)-Lm	$10^{-9}\sim10^{-5}$	0.4(<5)	pH1.2	Cat	11
As(V)	Lm-$(NH_4)_2MoO_4$-NH_4VO_3	—	6	—	Ox	7
	Lm-$(NH_4)_2MoO_4$-NH_4VO_3-2-丙醇	—	3	—	Ox	7

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/($g \cdot ml^{-1}$)	检出限/($ng \cdot ml^{-1}$)(RSD①/%)	反应条件	元素的作用	文献
As(Ⅴ)	O_3	—	0.15ng	—	Ox	7
Au(Ⅲ)	Lm-Cl^-	—	(10)	—	Ox	7
	Tween80-KOH-AuCl_4^-	10^{-8}～10^{-5}	5.0(1.8)	0.40mol·L^{-1}KOH	Ox	12
	CTMAB-H_2O_2-KOH-AuCl_4^-	10^{-8}～8×10^{-7}	5.5(6.5)	0.040mol·L^{-1}KOH	Ox	13
	Lm-H_2O_2-AuCl_4^-	10^{-10}～10^{-4}	0.32(1.78)	pH3	Cat	14
	Tween 40 KOH-H_2O_2-AuCl_4^-	10^{-9}～10^{-5}	0.2(4.4)	0.050mol·L^{-1}KOH	Cat	15
	氯化6,7-二羟基-2,4-二甲基苯并吡喃-H_2O_2	10^{-8}～10^{-6}	7(<7)	0.030mol·L^{-1}HCl	Cat	17
	Lm-H_2O_2-AuCl_4^-	10^{-10}～10^{-5}	4×10^{-2}	pH11.5	Ox	16
	香豆素-KOH-H_2O_2-AuCl_4^-	10^{-8}～8×10^{-7}	0.6(5.4)	0.45mol·L^{-1}KOH	Cat	18
Bi(Ⅲ)	Lm-H_2O_2-邻菲咯啉-TritonX-305-Bi(Ⅲ)	5×10^{-9}～10^{-5}	0.37	—	Cat	4
	Lc-H_2O_2	—	200		Cat	7
Br^-	N-(β-羧基丙酰基)异鲁米诺-H_2O_2-$Fe(CN)_6^{3-}$-Br^-	$(0～10^{-4})mol \cdot L^{-1}$	$1.4\times10^{-6}mol \cdot L^{-1}$(3.5)	pH11.6	阴离子交换	19
	Lm-Br_2	4×10^{-8}～10^{-5}	6		—	5
Cd(Ⅱ)	没食子酸-H_2O_2	—	800	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-Co^{2+}	—	20	—	Inh	7
	Lm-H_2O_2-Co^{2+}	—	—	—	Inh	6
Ce(Ⅲ)	Lc-H_2O_2	—	800	—	Cat	7
Ce(Ⅳ)	Lm-H_2O_2-Cu^{2+}	—	100	—	Inh	7
	硅氧烯	—	7×10^3	—	Ox	7
Cl^-	N-(β-羧基丙酰基)异鲁米诺-H_2O_2-$Fe(CN)_6^{3-}$-Cl^-	$(0～9\times10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	$10^{-6}mol \cdot L^{-1}$(2.5)	pH10.6	阴离子交换	19
	Lm-Na_3PO_4-$NaBO_3$	—	10	—	Ox	7
ClO^-	洛酚碱-H_2O_2-ClO^-	—	5	—	Cat	7
	丙酮-H_2O_2-ClO^-	5.0×10^{-8}～3.0×10^{-6}	50(4.3)	pH13.5	Ox	20
	Lc-H_2O_2-ClO^-	4×10^{-10}～2×10^{-7}	0.4	—		5
Cl_2-ClO^-	Lm-ClO^-	$(4\times10^{-11}～5\times10^{-10})g \cdot ml^{-1}$	18	—		4
	Lm-H_2O_2	—	50	—	Ox	7
	H_2O_2	—	4×10^3	—	Ox	7
	4-氯苯甲酸-5-溴-亚水杨基酰肼	—	50	—	Ox	7
ClO_4^-	Lm-H_2O_2-ClO_4^-	10^{-9}～10^{-4}	0.5	pH13.0	Ox	21
CN^-	Lm-氰化物	2×10^{-9}～10^{-7}	1.2(<4)	pH3.5	Red	22
	Lm-H_2O_2-Cu(Ⅱ)-CN^-	$(0～6\times10^{-6})ng \cdot ml^{-1}$	5	—		4
	Lm-H_2O_2-Cu(Ⅱ)	—	3×10^3	—	Inh	7
Co(Ⅱ)	对氨基苯磺酸-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$0～2.8\times10^{-8}$	0.4	pH9.8	Cat	23
	ABEI-H_2O_2-Co(Ⅱ)	5.0×10^{-11}～10^{-7}	10^{-2}(1.2)	0.10mol·L^{-1}KOH	Cat	24
	没食子蓝-H_2O_2-OH^-	10^{-11}～5.0×10^{-8}	0.01	0.05mol·L^{-1}KOH	Cat	25
	Lm-H_2O_2-Co(Ⅱ)	10^{-10}～10^{-6}	8×10^{-3}(7.2)	pH11.5～12.5	Cat	26
	槲皮素-H_2O_2-KOH	2.4×10^{-10}～6.4×10^{-9}	0.2(6.5)	0.96mol·L^{-1}KOH	Cat	27
	3,5-二溴水杨基荧光酮-CTMAB-H_2O_2	5×10^{-10}～2×10^{-7}	0.3(0.9)	0.1mol·L^{-1}NaOH	Cat	28
	茜素紫-CTMAB-H_2O_2	5×10^{-10}～1.2×10^{-8}	(3.6)	0.4mol·L^{-1}KOH	Cat	29

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml^{-1})	检出限/(ng·ml^{-1})(RSD①/%)	反应条件	元素的作用	文献
Co(Ⅱ)	磺基水杨酸-H_2O_2	$6\times10^{-10}\sim3\times10^{-7}$	10^{-3}(5.7)	pH2	Cat	30
	8-羟基喹啉氮氧化物-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$10^{-8}\sim10^{-7}$	8(3.2)	pH11.5	Red	31
	2,4-二甲氧基苯基荧光酮-CTMAB-H_2O_2	$10^{-9}\sim3\times10^{-7}$	0.257(2.8)	pH11.54	Cat	32
	对氨基苯磺酸-H_2O_2	$5.0\times10^{-11}\sim5.0\times10^{-7}$	0.01	pH10.0	Cat	33
	Lm-H_2O_2	$2\times10^{-10}\sim5\times10^{-5}$	0.1(2.7)	—	Cat	81
	酒石酸-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$3.5\times10^{-9}\sim2.0\times10^{-6}$	0.4	—	Cat	5
	Lm-H_2O_2-Cr^{2+}	$(10^{-11}\sim10^{-7}$	7.4×10^{-4}	—	Cat	4
	苏木色精-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$1.7\times10^{-9}\sim1.7\times10^{-6}$	3×10^{-2}	—	Cat	4
	没食子酸-H_2O_2-甲醛-Co(Ⅱ)	—	—	—	Cat	6
	Lc-H_2O_2	—	0.5	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2	—	2×10^{-2}	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2	—	40	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2	—	5×10^{2}	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-EDTA	—	6×10^{-3}	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-2-羟基乙基乙二胺三乙酸	—	0.4	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-水杨酸钠	—	0.3	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-荧光素-CTMAB	—	0.66	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-EDTA-$Na_2B_4O_7$-过癸酸	—	5	—	Cat	7
	Lm-二甲基乙二肟	—	4	—	Cat	7
	没食子酸-H_2O_2	—	0.4	—	Cat	7
	没食子酸-H_2O_2-甲醇	—	4×10^{-2}	—	Cat	7
	2,3-二氢-5-羟基-2,3-二氮杂萘-1,4-二酮-H_2O_2	—	6×10^{-4}	—	Cat	7
	洛酚碱-H_2O_2	—	0.1	—	Cat	7
	焦棓酚-H_2O_2	—	0.5	—	Cat	7
CO_2	O	—	10^{5}	—	Ox	7
$C_2O_4^{2-}$	Ru(2,2'-二吡啶)$_3^{2+}$	—	10^{2}	—	Red	7
Cr(Ⅲ)	碱性鲁米诺溶液中电生化学发光	$(2\times10^{-10}\sim2\times10^{-6})$mol·L^{-1}	1.2×10^{-10}mol·L^{-1}(3)	pH12.5	Cat	35
	Lm-H_2O_2,镀铜锌粒还原Cr(Ⅵ)成Cr(Ⅲ)	$(10^{-5}\sim10^{-9})$mol·L^{-1}	2.3×10^{-11}mol·L^{-1}(0.37～4.0)	pH12	Cat	36
	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ),酸性条件下H_2O_2还原Cr(Ⅵ)成Cr(Ⅲ)	$10^{-10}\sim3\times10^{-5}$	4×10^{-2}(<2)	pH12	Cat	37
	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ),H_2O_2将Cr(Ⅵ)还原为Cr(Ⅲ)	$(10^{-9}\sim10^{-6})$g	0.13(3.1)	pH=11.5～12.5	Cat	38
	罗丹明B-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	$4\times10^{-8}\sim8\times10^{-6}$	28	—	Cat	4
	Lm-H_2O_2	$2\times10^{-9}\sim1.8\times10^{-8}$		—	Cat	5
	Lm-H_2O_2	$10^{-10}\sim10^{-6}$	0.03	—	Cat	5
	Lm-H_2O_2	$5\times10^{-8}\sim4\times10^{-6}$	0.62(<3)	—	Cat	82
	Lc-H_2O_2-甲醇	—	5	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2-EDTA	—	50	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-EDTA	—	10^{-2}	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-EDTA-Br^-	—	7×10^{-3}	—	Cat	7
	4-氯苯甲酸-5-溴亚水杨基酰肼-KIO_4	—	2	—	Cat	7
	洛酚碱-H_2O_2	—	5	—	Cat	7
Cr(Ⅵ)	双(2,4,6-三氯苯)草酸-H_2O_2-芘	—	5×10^{3}	—	Cat	7

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g・ml^{-1})	检出限/(ng・ml^{-1}) (RSD①/%)	反应条件	元素的作用	文献
Cr(Ⅵ)	洛酚-H_2O_2-Cr(Ⅵ)	8×10^{-11}～5×10^{-4}	0.08	—		5
	Lm-亚铁氰化钾-Cr(Ⅵ)	10^{-10}～6×10^{-6}	0.02(<2)			83
Cu(Ⅱ)	Lm-$KMnO_4$-Cu(Ⅱ)	10^{-8}～10^{-6}	8.5	pH12.6	Inh	39
	Lm-MnO_4^--Cu(Ⅱ)	10^{-8}～2×10^{-6}	8.6(4.3)	pH12.3	Inh	40
	盐酸羟胺-CTMAB-Cu(Ⅱ)	2×10^{-8}～10^{-6}	5.6(2.9)	pH=4～5	Ox	41
	酸性靛蓝-H_2O_2-OH^-	10^{-8}～2×10^{-7}	0.3(3.3)	pH10.2	Cat	42
	Lm-CN^--Cu(Ⅱ)	4×10^{-10}～8×10^{-7}	0.01(2.1)	—		84
	1,10-phen-CTMAB-H_2O_2-Co(Ⅱ)	10^{-10}～4×10^{-8}	8×10^{-3}	—		5
	水杨基荧光酮-H_2O_2-CTMAB-Fe(Ⅱ)	—	—	—	Inh	6
	Lm-$K_3Fe(CN)_6$-H_2O_2	—	—	—	Inh	6
	Lm-KCN	2×10^{-2}～6×10^{-7}	9×10^{-3}	—		4
	邻菲啰啉-Co(Ⅱ)	2×10^{-10}～3×10^{-8}	3.8×10^{-3}	—		4
	邻菲啰啉-H_2O_2-CTMAB	(0～2×10^{-9}	9×10^{-2}	—		4
	Lm-KCN	—	0.1	—	Cat	7
	Lm-碘酸盐	—	1	—	Cat	7
	Lm-荧光素-CTMAB	—	60	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2	—	0.2	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2-$CoSO_4$	—	2	—	Inh	7
	Lc-H_2O_2-$MnSO_4$	—	0.3	—	Inh	7
	洛酚碱-H_2O_2	—	3	—	Cat	7
	黄素单核苷酸-H_2O_2	—	3	—	Cat	7
	4-氨基萘亚甲基酰肼-H_2O_2	—	0.8	—	Cat	7
Fe(Ⅱ)	聚乙二醇辛基苯基醚-H_2O_2-Fe(Ⅱ)	(10^{-7}～10^{-3})mol・L^{-1}	7.6×10^{-8}mol・L^{-1} (3.2)	pH5.0	Red	45
	8-羟基喹啉-H_2O_2-Fe(Ⅱ)	—	—	—		6
	培花青-H_2O_2-Fe(Ⅱ)	10^{-9}～2×10^{-7}	7.1×10^{-2}	—		4
	Lm-O_2-Fe(Ⅱ)	—	5×10^{-3}	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-Ac_2CH_2	—	10^{-5}%	—	Cat	7
	Lc	—	3	—	Red	7
Fe(Ⅲ)	Lm-H_2O_2	2×10^{-10}～10^{-7}	1.4×10^{-3}(3.4)	0.05mol・L^{-1}NaOH	Cat	43
	Lm-OH^--H_2O_2	2.0×10^{-10}～10^{-7}	6.0×10^{-4}(3.9)	pH4	Cat	44
	Lm-O_2-Fe(Ⅲ)	—	—	—		6
	Lm-$Fe(CN)_6^{4-}$-Fe(Ⅲ)	—	—	—		6
	Lc-H_2O_2	—	50	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-二亚乙基三胺	—	0.2	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-EDTA	—	3	—	Cat	7
	2,3-二氢-5-羟基-2,3-二氮杂萘-1,4-二酮-H_2O_2	—	0.3	—	Cat	7
Ge(Ⅱ)	Lm-$(NH_4)_2MnO_4$-I^--Ge(Ⅱ)	10^{-9}～4×10^{-6}	0.3	—		5
Ge(Ⅳ)	Lm-VO_3^--MoO_4^{2-}	—	5	—	Ox	7
Hf(Ⅳ)	Lm-H_2O_2-Cu(Ⅱ)	—	20	—	Inh	7
Hg(Ⅱ)	Lm-Cu(Ⅱ)-CN^-	10^{-8}～10^{-7}	2.8	—		5
	Lm-H_2O_2-Co(Ⅱ)	3×10^{-8}～3×10^{-6}	0.1	—		5
	Lm-$K_4Fe(CN)_6$-$Cu(CN)_4^{3-}$	8×10^{-10}～4×10^{-8}	0.22(3.4)	0.01mol・L^{-1}NaOH	Cat	46

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml^{-1})	检出限/(ng·ml^{-1})(RSD①/%)	反应条件	元素的作用	文献
Hg(Ⅱ)	Lm-KCN-Cu(Ⅱ)	—	2	—	Inh	7
	Lm-H_2O_2	—	2×10^{2}	—	Cat	7
H_2O_2	Lm-H_2O_2-ClO⁻-EDTA	$(5.0\times10^{-8}\sim10^{-5})$mol·$L^{-1}$	1.7(3.9)	pH9.5	Ox	48
	Lm-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$(3\times10^{-10}\sim3\times10^{-6})$g·$ml^{-1}$	0.1	pH10	Ox	47
	Lm-H_2O_2-NaClO	$(5.0\times10^{-8}\sim10^{-5})$mol·$L^{-1}$	4.5×10^{-8}mol·L^{-1}(3.7)	pH9.5	Ox	49
	4-羟基香豆素-Cu(Ⅱ)-CTMAB	$(10^{-2}\sim3\times10^{-5})$mol·$L^{-1}$	3×10^{-10}mol·L^{-1}	pH10.0	Ox	50
	ABEI-H_2O_2	$4\times10^{-10}\sim10^{-7}$	0.15(1.2)		Ox	85
	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	$3.4\times10^{-9}\sim3.4\times10^{-7}$	2.72×10^{-2}	—	Ox	4
	Lm-荧光素-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$3.8\times10^{-11}\sim3.8\times10^{\ 7}$		—	Ox	5
	Lm-Cu(Ⅱ)	—	7×10^{-1}	—	Ox	7
	Lm-$SbCl_6^-$	—	10	—	Ox	7
	Lm-$K_3Fe(CN)_6$	—	20	—	Ox	7
	Lm-氯化血红素	—	2	—	Ox	7
	Lm-氯化血红素-Cu(Ⅱ)-三乙醇胺	—	0.3	—	Ox	7
	Lm-$[Co(NH_3)_4(NO_2)_2]Cl$	—	2	—	Ox	7
	Lm-Cu(Ⅱ)-荧光素-CTMAB	—	4×10^{2}	—	Ox	7
	Lc-$Co(NO_3)_2$	—	5×10^{2}ng	—	Ox	7
	双(2,4,6-三氯苯基)草酸酯-苝	—	2	—	Ox	7
I^-	Lm-$KMnO_4$-I	$4\times10^{-10}\sim2\times10^{-8}$	0.4(4.1)	0.05mol·L^{-1}NaOH	Inh	51
	丙酮-H_2O_2-ClO⁻	$4\times10^{-10}\sim3\times10^{-7}$	2×10^{-2}(4.3)	pH13.5	Cat	52
	Lm-H_2O_2-$AuCl_4^-$	$10^{-10}\sim10^{-6}$	5×10^{-2}(2.1)	pH11.5	Inh	53
	Fe(Ⅱ)+I^-同Lm-Fe(Ⅲ)-O_2偶合反应	$10^{-5}\sim10^{-7}$	1.8	—		4
	H_2O_2-NaClO	—	0.3	—	Ox	7
Ir(Ⅲ,Ⅳ)	Lm-KIO_4	—	10	—	Cat	7
Ir(Ⅳ)	Lm-KIO_4-EDTA	—	1	—	Cat	7
	Lm	—	40	—	Ox	7
	Lm-H_2O_2	—	10	—	Cat	7
	4-氯苯甲酸-5-溴亚水杨基肼-KIO_4	—	0.2	—	Cat	7
Mn(Ⅱ)	Lm-H_2O_2	$10^{-9}\sim10^{-6}$	1	pH8.7	Cat	54
	Lm-KIO_4	$10^{-11}\sim10^{-7}$	0.12	—	Cat	5
	Lm-H_2O_2	—	10	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-1,10-phen-柠檬酸盐	—	0.5	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2	—	0.5	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2-有机胺	—	0.1μg	—	Cat	7
	没食子酸-H_2O_2	—	4×10^{2}	—	Cat	7
	洛酚碱-H_2O_2	—	10^{2}	—	Cat	7
	4-氯苯甲酸-5-溴亚水杨基酰肼	—	4	—	Cat	7
MnO_4^-	Lm-十二烷基磺酸钠-MnO_4^-	$5\times10^{-9}\sim5\times10^{-5}$	0.5	—	Ox	5
	硅氧烯	—	0.1μg	—	Ox	7
Mo(Ⅲ)	Lc-Mo(Ⅲ)	$10^{-10}\sim10^{-6}$	10^{-2}(2.0)	pH3.5	Red	55
Mo(Ⅵ)	Lm-溴酸钾-碘化钾	$10^{-8}\sim10^{-6}$	(<4)	pH12	Cat	56
	Lm-H_2O_2-$Na_2S_2O_3$	$10^{-9}\sim10^{-6}$	0.12(2.7)	pH2.5	Cat	57
	Lm-H_2O_2-KI	$10^{-9}\sim10^{-7}$	0.6(<6)	pH3.0	Cat	58
Nb(V)	Lm-H_2O_2-$K_3Fe(CN)_6$	$10^{-8}\sim10^{-6}$	2.3(3)	pH6.0	Inh	59
NH_3	O_3		1		Ox	7
	草酸双三氯苯酯-H_2O_2-邻苯二甲酸-NH_3	$0\sim6\times10^{-6}$	2×10^{-3}(2.5)	pH10.3		79

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)(RSD①/%)	反应条件	元素的作用	文献
NH_2-N	Lm-ClO^-	$2\times10^{-8}\sim5\times10^{-7}$	—	pH10.8	Inh	80
Ni(Ⅱ)	茜素紫-H_2O_2-CTMAB	$7\times10^{-9}\sim1.4\times10^{-7}$	(8.1)	0.4mol·L^{-1}KOH	Cat	29
	Lm-H_2O_2	$10^{-8}\sim10^{-6}$g	1.0ng/斑点(4.3)	pH12	Cat	60
	Lm-H_2O_2 电致发光	$3.5\times10^{-8}\sim2.1\times10^{-6}$	2.3	pH10.42	Cat	61
	Lm-H_2O_2	—	0.6	—	Cat	7
	Lm-$K_2S_2O_8$	—	20	—	Cat	7
	Lm-$K_2S_2O_8$-KIO_4	—	0.5	—	Cat	7
	Lm-癸酸	—	0.2	—	Cat	7
	Lm-癸酸	—	1	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2	—	3×10^2	—	Cat	7
	丙酮-H_2O_2-ClO^-	$5\times10^{-8}\sim4\times10^{-6}$	70	—	Cat	5
NO	O_3 或 O˙	—	1	—	Ox	7
	H˙	—	10^2	—	Ox	7
NO_2	O_3	—	1	—	Ox	7
	O˙	—	1	—	Ox	7
	H˙	—	10^2	—	Ox	7
	硅氧烯	—	10^{-2}	—	Ox	7
	Lm	—	5×10^{-2}	—	Ox	7
NO_2^-	Lm-$K_3Fe(CN)_6$-NO_2^-	$10^{-8}\sim6\times10^{-6}$	3.6(3.2)	pH1	Ox	62
	I_2-Lm-NO_2^--EDTA	$(10^{-7}\sim4\times10^{-4})mol\cdot L^{-1}$	$1.1\times10^{-8}mol\cdot L^{-1}$ (2.2)	—	Ox	34
	N-(β-羧基丙酰基)异鲁米诺-H_2O_2-$Fe(CN)_6^{3-}$	$(0\sim9\times10^{-5})mol\cdot L^{-1}$	$1.2\times10^{-6}mol\cdot L^{-1}$ (3.0)	pH10.6	阴离子交换	19
NO_3^-	N-(β-羧基丙酰基)异鲁米诺-H_2O_2-$Fe(CN)_6^{3-}$	$(0\sim8\times10^{-5})mol\cdot L^{-1}$	$1.0\times10^{-6}mol\cdot L^{-1}$ (2.2)	pH10.6	阴离子交换	19
	Lm	$(5\times10^{-8}\sim10^{-4})mol\cdot L^{-4}$	(0.84)	pH13	Ox	63
O	Lm-$(CH_3)_2SO$-叔丁醇	—	1.6×10^{-4}	—	Ox	7
	四(二甲基氨基)乙烯	—	—	—	Ox	7
O_3	罗丹明B-没食子酸	—	3×10^{-4}%	—	Ox	7
	乙烯	—	3	—	Ox	7
	罗丹明B(氧化硅胶)	—	1	—	Ox	7
	NO	—	4	—	Ox	7
OH˙	抗坏血酸-Cu(Ⅱ)-H_2O_2-酵母	—	(0.65)	pH6.2	Ox	64
Os(Ⅱ)	Lm-H_2O_2	—	10	—	Cat	7
Os(Ⅳ)	Lm-H_2O_2	—	1	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-溴化十八烷基二甲基苄胺	$10^{-3}\sim10^{-9}$	6×10^{-2}	pH12.6	Cat	65
Os(Ⅷ)	洛酚碱-H_2O_2	—	3	—	Cat	7
	4-氯苯甲酸-5-溴亚水杨基酰肼	—	5	—	Cat	7
Os(Ⅷ,Ⅵ)	Lm-H_2O_2	—	0.1	—	Cat	7
Os(Ⅷ,Ⅵ,Ⅳ)	Lc-H_2O_2	—	2×10^{-2}	—	Cat	7
PO_4^{3-}	PO_4^{3-} 催化钼酸铵氧化 I^- 与 Lm-I_2-O_2 发光反应偶合	$9.5\times10^{-9}\sim9.5\times10^{-7}$	4	—	Cat	4
	Lm-$(NH_4)_2MoO_4$-NH_4VO_3	—	3	—	Ox	7
	Lm-$(NH_4)_2MoO_4$-NH_4VO_3-丁醇	—	0.7	—	Ox	7
Pb(Ⅱ)	Lc-H_2O_2-Pb(Ⅱ)-乙醇	$3\times10^{-7}\sim8\times10^{-5}$	10^2(2.3)	1.0mol·L^{-1}NaOH	Cat	66
	Lc-H_2O_2-Pb(Ⅱ)	$0\sim10^{-4}$	5×10^2(1.9)	0.50mol·L^{-1}NaOH	Cat	67

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml^{-1})	检出限/(ng·ml^{-1})(*RSD*①/%)	反应条件	元素的作用	文献
Pb(Ⅱ)	Lm-H_2O_2	—	10^3	—	Cat	7
	Lc-H_2O_2	—	2×10^2	—	Cat	7
	没食子酸-H_2O_2	—	10^3	—	Cat	7
Pt(Ⅳ)	Lm-$NaClO_4$-KI-Pt(Ⅳ)	$4\times10^{-8}\sim2.4\times10^{-6}$	27(1.9)	0.08mol·L^{-1}KOH	Cat	68
	Lm-H_2O_2		10^{-2}	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-I^-,SCN^-		5×10^2	—	Cat	7
Rh(Ⅲ)	Lm-H_2O_2	—	40	—	Cat	7
	Rh(Ⅲ)催化 Mn^{2+}-BrO_3^- 生成 MnO_4^-,Lm-MnO_4^-	—	—	—	Cat	6
Ru(Ⅲ)	Lm-$NaBrO_3$-OH^-	$1.2\times10^{-7}\sim4\times10^{-7}$	0.8(2.1)	pH4.0	Cat	70
Ru(Ⅳ)	Lm-KIO_4-Triton X-100	$10^{-7}\sim10^{-9}$	0.39	pH13	Cat	69
	Lm-$K_2S_2O_8$	—	60	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2	—	1	—	Cat	7
	4-氯苯甲酸-5-溴亚水杨基酰肼	—	10	—	Cat	7
Ru(Ⅲ,Ⅳ)	Lm-H_2O_2-EDTA	—	0.3	—	Cat	7
Ru(Ⅲ,Ⅳ,Ⅵ,Ⅶ)	Lm-KIO_4	—	3	—	Cat	7
S^{2-}	Fe(Ⅱ)-Lm-O_2	$(10^{-8}\sim10^{-5})$mol·L^{-1}	4.3×10^{-10}mol·L^{-1}(<2)	pH3	Red	71
	Lm-I_2	—	5×10^{-9}g	—	Inh	7
	过氧化物酶-H_2O_2	—	0.1	—	Cat	7
	N_3^--Br_2-Br^--亚甲蓝	—	3	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	$6\times10^{-10}\sim10^{-7}$	0.25	—	—	5
SO_3^{2-}	MnO_4^--核黄素磷酸或亮核黄素	—	0.9ng	—	Red	7
	Lm-H_2O_2-KI	$1.1\times10^{-8}\sim1.1\times10^{-7}$	22.4	—	—	4
SO_2	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	$6\times10^{-9}\sim6\times10^{-6}$	1.5	—	—	5
	O·	—	1	—	Ox	7
SO_4^{2-}	*N*-(β-羧基丙酰基)异鲁米诺-H_2O_2-$Fe(CN)_6^{3-}$	$(0\sim8\times10^{-5})$mol·L^{-1}	8.0×10^{-7}mol·L^{-1}(2.0)	pH10.6	阴离子交换	19
Sb(Ⅴ)	Lm-H_2O_2	—	50	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2-二丁醚	—	5	—	Cat	7
	O_3	—	10ng	—	Ox	7
Se(Ⅳ)	O_3	—	35ng	—	Ox	7
	Lm-H_2O_2-$KMnO_4$	$10^{-6}\sim10^{-7}$	8.5	—	—	4
	Lm-H_2O_2-$KMnO_4$	$1.6\times10^{-9}\sim6.4\times10^{-7}$		—	—	5
SiO_3^{2-}	Lm-I_2	$10^{-8}\sim10^{-5}$	2	—	—	5
	Lm-$(NH_4)_2MoO_4$	—	10	—	Ox	7
	Lm-$(NH_4)_2MoO_4$-丁醇	—	2	—	Ox	7
Sn(Ⅳ)	邻菲罗啉-H_2O_2-Sn(Ⅳ)	$2.0\times10^{-9}\sim7.0\times10^{-7}$	0.16(1.4)	2.0mol·L^{-1}KOH	Cat	72
	O_3	—	110ng	—	Ox	7
RE(Ⅲ)	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	$(10^{-7}\sim10^{-4})$mol·L^{-1}	2.4×10^{-8}mol·L^{-1}	pH12	Inh	74
	Lm-H_2O_2	$5.5\times10^{-5}\sim2.2\times10^{-10}$	0.25(3.2)	pH2.5	Cat	73
Ta	Lm-H_2O_2-$K_3[Fe(CN)_6]$-Ta	$10^{-8}\sim10^{-6}$	5	—	—	4
Th(Ⅳ)	Lm-H_2O_2-Cu(Ⅱ)	—	10^3	—	Inh	7
Ti(Ⅳ)	Lm-H_2O_2-Cu(Ⅱ)	—	0.5	—	Inh	7
Tl(Ⅲ)	Lc-H_2O_2	—	4×10^2	—	Cat	7
	Lm-Na_3PO_4	—	50	—	Ox	7
	Lm-Tl(Ⅲ)	$4\times10^{-9}\sim1\times10^{-5}$	1(<4)	pH1.8	Ox	75
U(Ⅲ)	Lm-U(Ⅲ)	$10^{-9}\sim4\times10^{-6}$	0.3(2)	pH3.5	Red	76
U(Ⅳ)	O_3-H_2SO_4	—	2×10^2	—	Ox	7

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml^{-1})	检出限/(ng·ml^{-1})(RSD①/%)	反应条件	元素的作用	文献
U(Ⅵ)	Eu^{2+}-$HClO_4$	—	2	—	Red	7
V(Ⅱ)	Lm-V(Ⅰ)	4×10^{-10}~1×10^{-5}	8×10^{-2}(<2)	pH6.5	Red	77
V(Ⅳ)	Lm-O_2	—	10	—	Cat	7
	Lm-O_2-$P_2O_7^{4-}$	—	2	—	Cat	7
	Lm-H_2O_2	—	1	—	Cat	7
	Lm-KIO_4	—	10	—	Cat	7
	Lm-$(NH_4)_2MoO_4$-$(NH_4)_3PO_4$	—	5	—	Ox	7
	Lc	—	5	—	Red	7
V(Ⅴ)	Lm-H_2O_2-[Co$(NH_3)_4(NO_2)_2$]Cl	—	40	—	Inh	7
	硅氧烯	—	5×10^{-3}	—	Ox	7
	双(2,4,6-三氯苯基)草酸酯-H_2O_2-苝	—	5×10^{3}	—	Cat	7
	V(Ⅴ)催化H_2O_2-$S_2O_3^{2-}$反应与Lm-H_2O_2-K[Fe$(CN)_6$]偶合	5×10^{-10}~3×10^{-8}	0.43	—		4
	Lm-Fe$(CN)_6^{4-}$-V(Ⅴ)	—	—	—		6
WO_4^{2-}	溶酚碱	—	8×10^{3}	—	Cat	7
	W^{6+}催化H_2O_2-I^-生成I_2,Lm-O_2-I_2	—	—	—	Cat	6
	W^{6+}催化H_2O_2-I^-生成I_2,Lm-H_2O_2-I_2	2×10^{-8}~8×10^{-7}	0.14		Cat	4
Y(Ⅲ)	5-(对苯胺偶氮)-2,3-二氢-1,4-酞嗪二酮	10^{-8}~6×10^{-7}	2(8)	pH10	Cat	78
Zn(Ⅱ)	Lm-H_2O_2-Co(Ⅱ)	—	—	—	Inh	5
	Lm-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	—	—	—	Inh	6
	Lm-H_2O_2-Co(Ⅱ)	—	—	—	Inh	6
	Lm-H_2O_2-Co(Ⅱ)	—	10	—	Inh	7

① RSD—相对标准偏差。

本表参考文献：

1 王 伦. 分析测试学报，1995；14(3)：47

2 耿 征，武竞存，陈战国等. 分析化学，1995；23(4)：401

3 张新荣，吕九如，封满良等. 分析化学，1993；21(5)：575

4 章竹君. 分析试验室，1989；8(4)：35

5 章竹君，吕九如. 分析试验室，1991；10(4)：102

6 刘长松，魏雁声，晋卫军. 分析试验室，1995；14(4)：86

7 S. G. Schulman. Molecular luminescence Spectroscopy Methods and Applications，Part I. New York：Wiley，1985；468

8 李淑玲，赵锦端，金绪红等. 分析化学，1988；16(12)：1122

9 吕小虎，陆明刚. 分析测试通报，1992；11(2)：41

10 贾生华，周 箴. 分析化学，1995；23(10)：1228

11 耿 征，武竞存，惠炳杰等. 分析化学，1992；20(4)：423

12 韩鹤友，罗庆尧，余席茂. 化学试剂，1994；16(4)：196

13 张 帆，刘振鸣. 化学学报，1990；48：69

14 林守麟，潘 迹. 理化检验(化)，1987；23(2)：80

15 张 帆，刘振鸣. 分析化学，1988；16(6)：485

16 杨乡珍. 理化检验(化)，1993；29(6)：372

17 张 帆，黄少鹏，林金明. 分析化学，1991；19(7)：809

18 张 帆，刘振鸣. 分析化学，1988；16(12)：1119

19 庄惠生，张 帆，王琼娥. 化学学报，1995；53：168

20 吕小虎，陆明刚，赵贵文. 理化检验(化)，1990；26(6)：335

21 吕小虎，陆明刚，曹 军. 理化检验(化)，1992；28(6)：359

22 吕九如，张新荣，韩文德等. 分析化学，1992；20(5)：575

23 吕小虎，陆明刚，尹 方. 分析测试通报，1989；8(5)：9

24 李光浩，于振安. 化学学报，1991；49：906

25 张 帆，梅英华，陈 恒. 分析化学，1988；16(1)：5

26 章竹君，杨维平，吕九如. 高等学校化学学报，1994；15(8)：1146

27 张 帆，陈玉龙，周 雄等. 分析化学，1991；19(2)：147

28 李广祖，李名芳，张悟铭. 药物分析杂志，1990；10(1)：26

29 方国桢，刘 馨. 分析化学，1996；24(6)：743

30 凌明夫，陆明刚，陶能兵等. 分析化学，1986；14(12)：941

31 王 伦，朱昌青，吴家良等. 分析化学，1995；23(3)：325

32 赵锦瑞，何应律，周剑琦等. 分析化学，1993；21(5)：560

33 吕小虎，陆明刚. 高等学校化学学报，1991；12(7)：886

34 柳仁民，刘道杰．环境科学，1991；12(6)：64
35 严凤霞，王 伦，王筱敏等．光谱学与光谱分析，1990；10(6)：45
36 张海松，杨秀岑，伍莉萍．分析化学，1995；23(10)：1148
37 吕九如，张新荣，张八合等．高等学校化学学报，1993；14(6)：771
38 杨维平，章竹君．分析化学，1994；22(1)：71
39 李光浩，张继功，孟 中．理化检验（化），1993；29(5)：290
40 吕小虎，陆明刚，史文岩等．环境化学，1990；9(2)：69
41 张 帆，王华云，伦国瑞．分析化学，1991；19(9)：1027
42 张 帆，梅英华，林禅孜．分析化学，1988；16(8)：723
43 吕小虎，陆明刚，李喜青．生物化学与生物物理进展，1992；19(6)：464
44 陆明刚，吕小虎．化学世界，1989；(2)：68
45 朱昌青，王 伦，吴家良．分析化学，1995；23(12)：1402
46 赵志强，王志奎，贾予江等．分析化学，1996；24(6)：699
47 牛从容，李齐春．环境化学，1988；7(6)：34
48 吕小虎，陆明刚，杨晓慧等．理化检验（化），1990；26(4)：233
49 吕小虎，陆明刚．光谱学与光谱分析，1994；14(1)：123
50 谢光华，黄 岗．分析化学，1991；19(7)：823
51 张亚钢，牛从容，王顺荣．环境化学，1991；10(5)：70
52 吕小虎，陆明刚．分析试验室，1991；10(3)：22
53 林守麟，陈艳玲，吴招顺．分析化学，1988；16(3)：269
54 郑朱梓，王尊本．分析化学，1985；13(7)：510
55 吕九如，朱智甲．分析化学，1994；22(9)：909
56 张新荣，吕九如，朱绩新等．分析化学，1988；16(9)：806
57 马望百，张 炜，章竹君．分析化学，1988；16(9)：818
58 张竹君，吕九如，张新荣等．高等学校化学学报，1988；9(5)：519
59 李先文，王 屹，章竹君．分析测试学报，1995；14(4)：62
60 杨维平，章竹君．分析化学，1994；22(1)：27
61 安镜如，姚 晴．分析化学，1990；18(9)：867
62 唐宏武，罗庆尧，余席茂等．高等学校化学学报，1994；15(11)：1626
63 刘道杰，柳仁民，孙爱玲等．分析化学，1995；23(3)：321
64 陈季武，胡天喜．生物化学与生物物理进展，1992；19(2)：136
65 许晓文，胡澂文，江 东等．分析化学，1991；19(8)：962
66 宫立新，于振安．分析试验室，1995；14(3)：11
67 李光浩，于振安．高等学校化学学报，1991；12(9)：1167
68 胡守坤，李庆一，刘英进．化学试剂，1991；13(1)：50
69 许晓文，李玲颖，胡澄文等．高等学校化学学报，1990；11(1)：87
70 李庆一，胡守坤．分析化学，1994；22(12)：1203
71 吕九如，张新荣，张 静．分析化学，1989；17(6)：542
72 李 焕，于振安．高等学校化学学报，1993；14(8)：1076
73 李淑玲，赵锦端，金继红等．分析化学，1988；16(8)：692
74 武竞存，吕九如，章竹君．分析测试通报，1991；10(4)：49
75 耿 征，马朝东，章竹君．分析化学，1988；16(10)：935
76 吕九如，张新荣，封满良等．分析试验室，1994；13(2)：3
77 吕九如，张新荣，朱智甲等．高等学校化学学报，1991；12(12)：1595
78 安镜如，林金明，谢增鸿．高等学校化学学报，1991；12(5)：610
79 李定邦，张大年，指宿尧嗣．环境化学，1995；14(5)：460
80 刘道杰，柳仁民．分析化学，1991；19(3)：350
81 梁桂媛，刘 原，肖传建等．光谱学与光谱分析，1991；11(1)：21
82 高向阳，潘清梅，何 方等．环境化学，1991；12(3)：54
83 吕九如，张新荣等．分析化学，1992；20(1)：61
84 李光浩，于振安．化学通报，1992；(4)：42
85 李光浩，于振安．上海环境科学，1991；10(3)：32

表 24-4 有机物的化学发光及生物发光分析应用实例

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/$(g \cdot ml^{-1})$	检出限/$(ng \cdot ml^{-1})$ (RSD[1]/%)	反应条件	文献
维生素 B_{12}	鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	10^{-8}～10^{-7}	(2.25)	pH9.7	1
	鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	10^{-5}～10×10^{-6}	10	—	41
	鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	10^{-6}～10^{-4}	20(2.9)	—	43
抗坏血酸	鲁米诺-$K_3Fe(CN)_6$-抗坏血酸	$(4.0\times10^{-8}$～$10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	$4.0\times10^{-8}mol \cdot L^{-1}$ (0.5)	pH12	2
	铈(Ⅳ)-抗坏血酸-罗丹明6G	$(3.0\times10^{-7}$～$10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	$10^{-7}mol \cdot L^{-1}$ (1.1)	$0.8mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4	3
	Fe(Ⅱ)-抗坏血酸-鲁米诺	10^{-7}～10^{-5}	21(4.5)	$0.1mol \cdot L^{-1}$ NaOH	4
	Cu(Ⅱ)-抗坏血酸-鲁米诺	$(2\times10^{-6}$～$6\times10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	(1.1)	pH6.0	5
	$KMnO_4$-抗坏血酸	$(5.0\times10^{-7}$～$4.0\times10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	$3.0\times10^{-7}mol \cdot L^{-1}$ (1.6)	$3mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4	6
2,4-二硝基氯苯	2,4-二硝基氯苯-水合肼-$KMnO_4$	3.4×10^{-7}～1.7×10^{-5}	50	$0.54mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4	7
双乙酰	鲁米诺-H_2O_2-双乙酰	$(6.0\times10^{-7}$～$1.2\times10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	$4.0\times10^{-7}mol \cdot L^{-1}$ (2)	pH9.8	8
甲醛	光泽精-H_2O_2-ClO^-	10^{-9}～10^{-7}	—	—	41
	没食子酸-H_2O_2	$(2\times10^{-10}$～$10^{-7})mol \cdot L^{-1}$	$2\times10^{-10}mol \cdot L^{-1}$	25-50 $mmol \cdot L^{-1}$	10
乙醛	异丙醇-ClO^--H_2O_2	5.0×10^{-10}～1.0×10^{-6}	0.1	pH13.3	9

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/($g \cdot ml^{-1}$)	检出限/($ng \cdot ml^{-1}$) (RSD①/%)	反应条件	文献
敌敌畏	鲁米诺-H_2O_2-二乙三胺五乙酸	$0 \sim 7\times10^{-7}$	20(0.8)	pH8	11
硫代膦酸酯	硫代膦酸酯-$HgCl_2$-F^- 与鲁米诺-H_2O_2 二乙三胺五乙酸发光反应偶合	$0 \sim 7\times10^{-7}$	(1.3)	pH8	12
硫脲类物质	鲁米诺-H_2O_2-Cr(Ⅲ)-硫脲	$(3.0\times10^{-4} \sim 2.0\times10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	(3.2)	pH=10~11.5	13
仲胺	双(2-硝基苯基)草酸酯-H_2O_2	—	5.8~10.0fmol	pH6.5	14
胺碘酮	鲁米诺-H_2O_2-四氯合金	$(10^{-9} \sim 10^{-5})mol \cdot L^{-1}$	—	pH11.82	15
芘	双(2,4,6-三氯苯)草酸酯-H_2O_2	(2.8~700)pg	2.8pg(2.97)	pH6.5	16
总有机碳	$K_2S_2O_8$-有机碳-鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$1.0\times10^{-7} \sim 1.2\times10^{-5}$	40(1.7)	pH9.2	17
苯酚	鲁米诺-H_2O_2(猝灭)	—	—	—	42
厚朴酚	鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$10^{-9} \sim 10^{-5}$		pH9.8	18
穿心莲内酯	鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$2\times10^{-8} \sim 10^{-6}$	18.9(3.14)	pH9.2	19
尿酸	鲁米诺-$K_3Fe(CN)_6$ 固定化尿酸酶	$4\times10^{-8} \sim 10^{-5}$	16(2.6)	pH10.0	20
	鲁米诺-尿酸氧化酶-辣根过氧化物酶-戊二醛	$10^{-7} \sim 5\times10^{-6}$	—	pH8.5	21
苦杏仁甙	鲁米诺-H_2O_2-Cr(Ⅲ)	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	—	pH10.5	22
葡萄糖	葡萄糖氧化酶-鲁米诺-$K_3Fe(CN)_6$	$2\times10^{-6} \sim 2\times10^{-4}$	—	pH7.8	23
	葡萄糖-Cu(Ⅱ)-鲁米诺-H_2O_2	$(10^{-3} \sim 10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	83(2.6)	pH10	24
	鲁米诺-H_2O_2-$K_3Fe(CN)_6$	$2\times10^{-7} \sim 2\times10^{-4}$	—	—	41
	鲁米诺-H_2O_2-$K_3Fe(CN)_6$	$1.5\times10^{-8} \sim 2.5\times10^{-7}$	0.1	—	41
	过氧化物酶-H_2O_2-酪氨酸	$10^{-7} \sim 10^{-6}$	—	—	41
酪氨酸	过氧化物酶-H_2O_2 酪氨酸	$0 \sim 2\times10^{-3}$	—	—	41
天麻素	鲁米诺-H_2O_2-$K_3Fe(CN)_6$	$(2\times10^{-5} \sim 10^{-2})mol \cdot L^{-1}$	2	—	41
丹皮酚	鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$10^{-8} \sim 10^{-5}$	1.3(<2)	pH2	25
N-(β-羧丙酰基)异鲁米诺	N-(β-羧丙酰基)异鲁米诺电致化学发光	$(4.0\times10^{-10} \sim 7.0\times10^{-6})mol \cdot L^{-1}$	$2.0\times10^{-10}mol \cdot L^{-1}$ (4)	pH11.6	26
	N-(β-羧丙酰基)异鲁米诺-H_2O_2	$(2\times10^{-10} \sim 10^{-8})mol \cdot L^{-1}$	$10^{-10}mol \cdot L^{-1}$ (6.4)	pH10.6	27
	N-(β-羧丙酰基)异鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)	$(4\times10^{-11} \sim 10^{-9})mol \cdot L^{-1}$	$8\times10^{-12}mol \cdot L^{-1}$ (7)	pH10.6	27
鲁米诺	鲁米诺-H_2O_2-Co(Ⅱ)-腺嘌呤	$(5\times10^{-13} \sim 5\times10^{-9})mol \cdot L^{-1}$	$5\times10^{-13}mol \cdot L^{-1}$	$10mol \cdot L^{-1}$ NaOH	28
ABEI	ABEI 电化学发光,Co(Ⅱ)催化	$(10^{-10} \sim 5.0\times10^{-7})mol \cdot L^{-1}$	$2.0\times10^{-11}mol \cdot L^{-1}$	pH11.06	29
	鲁米诺-ABEI-H_2O_2-Co(Ⅱ)腺嘌呤	$(1.3\times10^{-12} \sim 5\times10^{-9})mol \cdot L^{-1}$	$1.3\times10^{-12}mol \cdot L^{-1}$	$10mol \cdot L^{-1}$ NaOH	28
ABEI-18-炔诺酮	鲁米诺-ABEI-18-炔诺酮-H_2O_2-Co(Ⅱ)-腺嘌呤	$(3.2\times10^{-12} \sim 5\times10^{-9})mol \cdot L^{-1}$	$3.2\times10^{-12}mol \cdot L^{-1}$	$10mol \cdot L^{-1}$ NaOH	28
丹磺酰丙氨酸	双五氯苯基草酸酯-H_2O_2	$(10^{-14} \sim 10^{-11})mol \cdot L^{-1}$	$10^{-15}mol \cdot L^{-1}$	pH5	30
SOD 活力	黄嘌呤氧化酶-黄嘌呤或次黄嘌呤-鲁米诺-SOD	$0 \sim 10^{-8}$	C_{50}3.5	pH7.8 pH10.2	31
	黄嘌呤氧化酶-黄嘌呤-鲁米诺-SOD	$0 \sim 8\times10^{-9}$	C_{50}8.2(3.62)	pH10.2	32
	SOD-碱性二甲基亚砜-鲁米诺	$0 \sim 6\times10^{-9}$	C_{50}0.82(5.8)	pH9.86	33
	黄嘌呤氧化酶-黄嘌呤-鲁米诺-SOD		(<3.8)	pH10.2	34
癌细胞	ATP-荧光素酶-荧火虫素		$10^{-11}mol \cdot L^{-1}$	pH7.8	36
活菌总数	ATP-荧光虫发光素酶-荧火虫发光素	$(1.6\times10^{5} \sim 1.6\times10^{8})$细菌个数$\cdot ml^{-1}$	$10^{-13}mol$	pH7.75	35
金黄色葡萄球菌	ATP-荧光虫发光素-发光素酶	$(10^{4} \sim 10^{8})CFU \cdot ml^{-1}$	(<10)	pH8.6	37
荧光素酶	荧光素酶-H_2O_2-荧光素	—	—	—	38

续表

被测组分	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)(*RSD*①/%)	反应条件	文献
细菌荧光素酶,黄酶	FMN-NADH-荧光素酶-黄酶	—	—	—	40
小麦抗穗发芽能力	超弱发光	—	—	—	39

① *RSD*—相对标准偏差。

本表参考文献:

1 王尊本,郑朱梓,何君式等. 分析化学,1988;16(4):360
2 杨维平,李宝林,章竹君等. 分析化学,1996;24(5):579
3 王　伦,朱昌青,杨　耿等. 分析化学,1995;23(1):83
4 唐宏武,罗庆尧,余席茂等. 分析化学,1995;23(2):240
5 封满良,吕九如,章竹君等. 分析化学,1995;23(1):70
6 朱昌青,王　伦,吴家良. 分析试验室,1996;15(1):49
7 刘杏忠,何治柯,罗庆尧等. 分析化学,1995;23(6):652
8 王　伦,周运友,朱昌青. 分析化学,1995;23(12):1367
9 吕小虎,陆明刚. 高等学校化学学报,1991;12(8):1038
10 于向东,王　萍,刘国诠. 分析化学,1989;17(5):385
11 袁进华,曹金鸿. 分析化学,1985;13(8):640
12 袁进华,曹金鸿. 分析化学,1985;13(10):764
13 何治柯,袁　丁,罗庆尧等. 分析测试学报,1994;13(1):33
14 傅承光,徐宏达,王　志. 分析测试学报,1994;13(1):25
15 庞志功,汪宝琪,周　红. 分析化学,1991;19(4):440
16 刘庆京,傅承光. 分析测试通报,1990;9(2):33
17 柳仁民,刘道杰,张子红等. 分析试验室,1995;14(2):12
18 汪宝琪,庞志功. 药物分析杂志,1991;11(5):298
19 庞志功,汪宝琪,尹　鸿. 分析试验室,1994;13(5):28
20 杨敏丽,吕九如,章竹君. 分析试验室,1993;12(1):100
21 章竹君,马望百,杨敏丽. 分析化学,1992;20(9):1048
22 耿　征,王　玲,汪宝琪等. 药物分析杂志,1990;10(2):86
23 张利华,张志良,沈曾佑. 生物化学与生物物理进展,1990;17(3):239
24 周　斌,刘宝璋,郑　敏. 食品与发酵工业,1994;(3):1
25 汪宝琪,庞志功,张　清. 中国药学杂志,1994;29(1):35
26 安镜如,王东进,孙敏顺等. 分析化学,1994;22(11):1158
27 庄惠生,张　帆,王京娥等. 化学试剂,1994;16(3):129
28 张　帆,陈燕榕,李兆强. 分析试验室,1994;13(2):1
29 姚　晴,安镜如. 高等学校化学学报,1991;12(4):469
30 丁向东,刘国诠,李凡英等. 分析化学,1987;15(7):582
31 李益新,方允中. 生物化学与生物物理进展,1983;(2):59
32 蓝开蔚,黄建鸣,谢之荣等. 生物化学与生物物理进展,1988;15(2):138
33 赵琢道,黎鳌,杨宗城等. 生物化学与生物物理进展,1987;14(6):55
34 田亚平,沈文梅,赵厚安等. 中华医学检验杂志,1991;14(6):381
35 王华全. 食品科学,1992;(7):43
36 康　建,董宝印,姜志明等. 生物化学与生物物理进展,1992;19(3):222
37 赵文明,徐孝仪,王敏珍等. 中华医学检验杂志,1989;12(4):217
38 吴自荣,惠永照. 生物化学与生物物理进展,1990;17(6):479
39 周　禾,杨起简. 生物化学与生物物理进展,1995;22(3):241
40 聂松青. 生物化学与生物物理进展,1984;(3):39
41 章竹君,吕九如. 分析试验室,1991;10(4):102
42 刘长松,魏雁声,晋卫军. 分析试验室,1995;14(4):86
43 Zhao Y K, Li H et al. Anal Chim Acta 1991;243:127

表 24-5　化学发光免疫分析与生物发光免疫分析应用实例

被测物质	标记物	被标记物	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)(*RSD*①/%)	反应条件	文献
辣根过氧化物酶(HRP)	HRP	—	HRP-对碘苯酚-鲁米诺-H_2O_2-X光胶片	—	1.4×10^{-15} mol	pH8.5	1
	HRP		$K_4[Fe(CN)_6]$-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-8}~1.0×10^{-6}	10	pH=2.5~3	2
		—	KI-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-10}~6.0×10^{-8}	0.1	pH=3.5~3.6	
			对羟基苯甲酸-H_2O_2-HRP-Luminol-Co^{2+}	1.0×10^{-8}~1.0×10^{-6}	10	pH4.7	
			抗坏血酸-H_2O_2-HRP-Luminol-Co^{2+}	1.0×10^{-8}~1.0×10^{-6}	10	pH4.7	
			Eosin-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-10}~7.0×10^{-8}	0.1	pH=3.5~3.6	

续表

被测物质	标记物	被标记物	反应体系或试剂	线性范围/($g \cdot ml^{-1}$)	检出限/($ng \cdot ml^{-1}$)(RSD①/%)	反应条件	文献
辣根过氧化物酶(HRP)			四氯四碘荧光素-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-9}~1.0×10^{-7}	1		
			荧光素-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-9}~1.0×10^{-7}	1		
			二溴荧光素-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-9}~1.0×10^{-7}	1		
			荧光素汞-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-8}~5.0×10^{-6}	10		
			荧光胺-H_2O_2-HRP-Luminol	1.0×10^{-8}~1.0×10^{-6}	10		
	HRP	HBsAg, HBs-Ab, HBeAb, PHSAR	KI-H_2O_2-HRP-鲁米诺	10^{-11}~6×10^{-9}	7×10^{-3} (7.5)	pH=3.5~3.7	3
CuZn-SOD	ABEI	人 CuZn-SOD	H_2O_2-氯化血红素-ABEI	10^{-9}~5×10^{-7}	(<6.0)	0.3 $mol \cdot L^{-1}$ NaOH	4
载脂蛋白 AI	ABEI	兔抗人 ApoAI	H_2O_2-氯化血红素-ABEI	3.6×10^{-8}~2.36×10^{-6}	36(8.9)	pH7.5	5
载脂蛋白 AII	ABEI	羊抗人 Apo AII	H_2O_2-氯化血红素-ABEI	2.25×10^{-8}~7.2×10^{-7}	22.5(7.9)	pH7.5	5
载脂蛋白 B	ABEI	兔抗人 ApoB	H_2O_2-氯化血红素-ABEI	2×10^{-8}~1.26×10^{-6}	20(7.9)	pH7.5	5
铁蛋白	HRP	铁蛋白抗体	鲁米诺-H_2O_2-HRP-对碘苯酚	1.2×10^{-10}~2.0×10^{-8}	0.12(3.7)	pH8.5	6
甲胎蛋白	HRP	甲胎蛋白抗体	HRP-H_2O_2-曙红, HRP-H_2O_2-鲁米诺	10^{-10}~10^{-7}	0.08	pH9.5	7
人巨细胞病毒 DNA	HRP	HCMVDNA	HRP-鲁米诺-H_2O_2	—	2×10^{-4}g		8
抗 DNA 抗体	HRP	抗人 IgG 小鼠单克隆抗体	HRP-鲁米诺-H_2O_2-对碘苯酚	—	(2.4)	pH8.5	9
恶性疟 DNA	HRP	DNA	HRP-鲁米诺-H_2O_2	—	2.5×10^{-2}g	—	10
HBV DNA	HRP-PBO-PEI	DAN	HRP-鲁米诺-H_2O_2	—	3×10^{-5}g	—	11
孕酮	ABEI	孕酮	ABEI-氯化血红素-H_2O_2	0~10^{-10}g/管	(<5)	pH7.5	12
	二烃基氨基鲁米诺	孕酮	H_2O_2-二烃基氨基鲁米诺-微量过氧化物酶	(2.4×10^{-11}~4×10^{-10})g/管	—	—	30
乙型肝炎表面抗原	HRP	HBsAb	HRP-鲁米诺-H_2O_2	—	(7.2)	pH8.5	13
	鲁米诺	脂化生物素抗体		6.25×10^{-9}~2.0×10^{-7}	6.25(8.20)		14
病毒性肝炎病原分型	异鲁米诺	马抗人 IgM	ABEI-氯化血红素-H_2O_2		(5.3)	pH7.5	15
麻疹病毒抗体	HRP	马抗人 IgG 抗体	鲁米诺-H_2O_2-对碘苯酚-HRP	—	(2.95)	pH8.5	16
表皮生长因子	吖啶酯	IgG	吖啶酯-H_2O_2	4×10^{-10}~2.5×10^{-8}	0.4(7.3)	0.04$mol \cdot L^{-1}$NaOH	17
人绒毛膜促进性激素	ABEI	HCG	ABEI-HCG 电致化学发光免疫分析	0~1.5×10^{-7}	(4.7)	pH11	18
C-反应蛋白	ABEI	生物素	ABEI-氯化血红素-H_2O_2	1.25×10^{-9}~1.6×10^{-7}	0.625(4.8)	—	19
流行性出血热免疫复合物	HRP	羊抗人 IgG	鲁米诺-H_2O_2-对苯基酚	10^{-5}~10^{-6}	48(<4.28)	pH8.0	20
人淋巴细胞低密度脂蛋白受体功能	ABEI	LDL	氯化血红素-H_2O_2-ABEI	—	0.1ml/管(6.9)	—	21
人皮肤纤维母细胞高密度脂蛋白受体功能	ABEI	HDL_3	ABEI-氯高铁血红素-H_2O_2	—	—		22
活性氧			HRP-PMN-鲁米诺	—	—		23
中性粒细胞			PMN-鲁米诺-OZ	—	—	pH7.4	24
			细菌内毒素-PMN	—	—		25
			PMN-鲁米诺-OZ	—	—		26
淋巴细胞			PBLC-鲁米诺-ConA	—	—		26
			PBLC-鲁米诺-ConA-ROS	—	—		27

续表

被测物质	标记物	被标记物	反应体系或试剂	线性范围/(g·ml⁻¹)	检出限/(ng·ml⁻¹)(RSD①/%)	反应条件	文献
淋巴细胞			PBLC-鲁米诺-ConA-钙离子通道阻断剂	—	—		27
人单个核细胞亚群			PBLC-鲁米诺-ConA(PHA,SPA,OZ)	—	—		28
组织型纤溶酶原激活剂活力	ABEI	Fg	ABEI-氯化高铁血红素-H_2O_2	(0.156~40)IU·ml^{-1}	0.156 IU·ml^{-1} (6.6)	pH8.5	29
人 IgG	鲁米诺	人 IgG	H_2O_2-氯化血红素	(5~50)μg/管	5μg/管	—	31
兔 IgG	偶氮鲁米诺	抗兔 IgG	H_2O_2-NaClO	$5\times10^{-9}\sim8\times10^{-8}$	5	—	32
	异鲁米诺		微量过氧化物酶-H_2O_2	—	—	—	33
睾丸激素	偶氮鲁米诺	睾丸激素-卵清蛋白	H_2O_2-$Cu(Ac)_2$	$(10^{-10}\sim10^{-8})$g/管	—	—	34
生物素	烟酰胺-6-(2-氨基乙基氨基)嘌呤二核苷酸	生物素	荧光素酶-黄素-单核苷酸	$(3\times10^{-8}\sim2\times10^{-7})$mol·$L^{-1}$	—	—	40
	二烃基氨基鲁米诺	生物素	H_2O_2-乳过氧化物酶(黄嘌呤氧化酶—次黄嘌呤-产生的超氧化物自由基)	$(5\times10^{-8}\sim4\times10^{-7})$mol·$L^{-1}$	—	—	36
皮质醇	异鲁米诺	皮质醇	H_2O_2-微量过氧化物酶	$(2\times10^{-11}\sim10^{-9})$g/管	—	—	37
	过氧化物酶	皮质醇	H_2O_2-鲁米诺	$(10^{-11}\sim10^{-9})$g/管	—	—	38
兔抗人血清白蛋白	过氧化物酶	羊抗兔 IgG	鲁米诺-H_2O_2	$5\times10^{-4}\sim7\times10^{-7}$	—	—	39
雌三醇-6α-葡糖苷酸	异鲁米诺	雌三醇-6α-葡糖苷酸	H_2O_2-微量过氧化物酶	$(10^{-11}\sim10^{-10})$g	—	—	34
葡萄球菌素肠毒素 B	过氧化物酶	IgG(抗葡萄球菌素肠毒素 B)	H_2O_2-焦棓酚	$(10^{-9}\sim10^{-8})$g	—	—	41
甲状腺素	二烃基氨基鲁米诺	T_4	H_2O_2-微量过氧化物酶	$(2\times10^{-8}\sim1.5\times10^{-7})$mol·$L^{-1}$	—	—	35
N(2,4-二硝基苯基)-β-氨基丙酸	腺苷-5'-四磷酸	2,4-二硝基苯基残基	荧光素酶-Mg^{2+}-荧光素	$4\times10^{-9}\sim10^{-8}$	—	—	42
2,4-二硝基苯基-6-氨基己酸盐	烟酰胺-6-(2-氨基乙基氨基)嘌呤二核苷酸	2,4-二硝基苯基残基	荧光素酶-黄素-单核苷酸	$(2.5\times10^{-7}\sim1.5\times10^{-6})$mol·$L^{-1}$	—	—	40

① RSD—相对标准偏差。

本表参考文献：

1 杨秀岑,刘晓宇,张弘等.中华医学检验杂志,1993;16(1):8

2 张书圣,江淑芙,章竹君.分析化学,1991;19(3):895

3 章竹君,拜明岐,张新荣.化学学报,1991,49:389

4 田亚平,沈文梅,刘智峰等.生物化学与生物物理进展,1989;16(4):310

5 施秉仪,蒋滋慧,黎 健等.生物化学与生物物理学报,1988;20(5):451

6 封满良,章竹君,,张新荣.分析化学,1994;22(8):788

11 杨晓林,王申五.生物化学杂志,1993;9(5):581

12 陈文勇.生物化学与生物物理进展,1991;18(6):475

13 张新荣,封满良,吕九如等.化学学报,1994;52:83

14 吴 敏,田 红,李 彤等.中华医学检验杂志,1991;14(1):12

15 鲁志新,李 黎,陶增玳等.中华医学检验杂志,1986;9(4):225

16 章竹君,邹克湘,程明浩.高等学校化学学报,1994;15(4):515

22 吴秉贞，薛隆翠，盛晓红．生物化学杂志，1992；8(5)：614
23 康　建，初俊杰，赖舒华等．生物化学与生物物理进展，1990；17(4)：307
24 杨俊齐，刘　璇．中华医学检验杂志．1989；12(4)：228
25 何炬斌，焦炳华．生物化学与生物物理进展，1990；17(6)：434
26 张学军，刘亦芬，毕克菊．中华医学检验杂志，1992；15(6)：363
27 张学军，刘　斑，司传平．生物化学与生物物理进展．1990；17(6)：444
28 张学军．生物化学与生物物理进展，1993；20(4)：320
29 蒋滋慧，王会信，谢文光等．生物化学杂志，1991；7(5)：595
30 Kohen F，Pazzagli M，Kim JB et al．FEBS Lett，1979；104：201
31 Hersh L S，Vann W P，Wilhem S A．Anal Biochem，1979；93(2)：267
32 Simpson J S A，Campbell A K，Ryall M E T et al．Nature，1979；279：646
33 Patel A，Davies C J，Campbell A K et al．Anal Biochem，1983；129(1)：162
34 Pratt J J，Woldering M G，Villerivs L．J Immunol Methods，1978；21(1－2)：179
35 Schroeder H R，Yeager F M，Boguslaski R C et al．J Immunol Methods，1979；25(3)：275
36 Schroeder H R，Vogelhut P O，Paul O et al．Anal Chem，1976；48(13)：1933
37 Kohen F，Pazzagli M，Kim J B et al．Steroids，1980；36(4)：421
38 Arakawa H，Maeda M，Tsuji A．Anal Biochem，1979；97(2)：248
39 Olsson T，Brunius G，Carlsson H E et al．J Immunol Methods，1979；25(2)：127
40 Schroeder H R，Carrico R J，Boguslaski R C et al．Anal Biochem，1976；72：283
41 Valan B，Halmann M．Immunochemistry，1978；15：331
42 Carrico R．J，Yeung K K，Schroeder H R et al．Anal Biochem，1976；76：95

参 考 文 献

1 纪庆娥，黄如衡．分析化学，1993；21(9)：1098
2 许金钩．化学通报，1988；(4)：1
3 郑用熙，王志刚．分析化学，1987；15(9)：852
4 章竹君，吕九如等．化学试剂，1987；9(3)：149
5 耿　征．化学通报，1992；(11)：1
6 周宜开，李　红．药物分析杂志，1989；9(6)：372
7 武竞存，章竹君等．分析化学，1994；22(4)：396
8 张　帆，刘振鸣．分析化学，1989；17(11)：1051
9 慈云祥，常文保等．分析化学，1992；20(9)：1100
10 沈建民，孙铁民等．化学试剂，1988；10(3)：178
11 李益新．生物化学与生物物理进展，1986(2)：45
12 张新荣，封满良等．化学学报，1994；52：83
13 章竹君，杨维平等．分析化学，1994；22(1)：23
14 卢建忠，章竹君．化学学报，1996；54：71
15 Ramis Ramos G，Khasawneh I．M，Garcia Alvarez Coque M．C．et al．Talanta．1988，35：41

索　　引

A

B

C

D

E

F

G

H

J

K

L

M

N

P

Q

R

S

T

W

X

Y

Z

Z